

# **Untersuchungen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit von Kfz-Signallichtfunktionen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

**Dipl.-Ing. Daniel Mensch**

geboren am 30.07.1981

in Dresden, Deutschland

vorgelegt am: 29. November 2011

verteidigt am: 11. Mai 2012

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz  
Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann  
Dr.-Ing. Karsten Köth

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung Licht und Sicht der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz für die Betreuung dieser Arbeit und die förderlichen Diskussionen im Entstehungsprozess, mit deren Hilfe viele Hürden leichter zu überwinden waren. Den übrigen Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik danke ich für die aufmunternde und kritische Betrachtung des Themas.

Herzlich danken möchte ich auch den Herren Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann und Dr.-Ing. Karsten Köth für die Übernahme des Koreferats, die kritische Durchsicht der Arbeit und die äußerst hilfreichen Ratschläge und Hinweise.

Der Volkswagen AG im Allgemeinen und den Herren Henning Kiel, Sebastian Häring, Mathias Thamm, Berend Wegner, Dr.-Ing. Johannes Neft und Dr.-Ing. Gunnar Koether im Speziellen möchte ich danken, dass sie diese Arbeit ermöglicht haben. Die fachliche und persönliche Unterstützung, die messtechnische Ausstattung, der Spielraum für kreative und unkonventionelle Ideen und entscheidende Impulse für die Lösung herausfordernder Fragestellungen führten zu einer schnellen Umsetzung meiner Ideen, in einem manchmal doch eher zähen Konzernumfeld.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die dieses Vorhaben von Anfang bis Ende unterstützten, meiner Freundin Saren, die mir in allen Situationen ermunternd und helfend zur Seite stand, und den nachfolgenden Personen ohne deren kritische Beanstandungen diese Arbeit niemals möglich gewesen wäre: Diana Berg, Susanne Köhler, Hendrik Weise, Christian Studeny, Sebastian Vogler, Martin Kleimeyer, Alexander Thiel, Franz Schmidt und Tobias Porsch.

Wolfsburg, im Mai 2012

Daniel Mensch

# Kurzfassung

Über die Beleuchtungseinrichtungen am Fahrzeug werden unter anderem Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen von vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen signalisiert. Neben diesem Sicherheitsaspekt dienen die Scheinwerfer und Leuchten eines Fahrzeugs dem Designer als wichtiges Gestaltungselement und Differenzierungsmerkmal. Bislang lag vor allem das Design bei Tag im Fokus. Mittlerweile soll auch bei Dämmerung oder Nacht über eine definierte Lichtsignatur, also die sichtbare leuchtende Fläche der Signalfunktion, eine eindeutige Identifikation der Marke erzielt werden.

Dazu ist es nötig, dass die leuchtende Fläche aus nahezu allen Beobachtungsrichtungen gleichmäßig erscheint. Das heißt, dass eine Beurteilung der Gleichmäßigkeit der leuchtenden Fläche aus nur einer Hauptrichtung nicht ausreicht. Innerhalb der gesetzlichen Regelungen für Signalleuchten sind bezüglich der Gleichmäßigkeit keine Anforderungen formuliert. Geeignete Methoden zur Messung und Bewertung der Gleichmäßigkeit müssen erst entwickelt werden, denn die vorhandenen werden den neuen Möglichkeiten in der Konstruktions- und Fertigungstechnik nicht gerecht. Vor allem Signalleuchten mit mehreren leuchtenden Flächen, einer Vielzahl von LED-Kammern oder tiefen Designblenden, stellen eine große Herausforderung für die Messtechnik und die Bewertungskriterien dar.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht ein automatisiertes Mess- und Bewertungsverfahren zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten. Dafür erfolgt eine präzise Definition der Gleichmäßigkeit und eine Gewichtung der Einflussfaktoren. Die Ergebnisse einer psychophysikalischen Untersuchung zur Akzeptanz von Leuchtdichteunterschieden innerhalb einer leuchtenden Fläche und zwischen benachbarten leuchtenden Flächen sowie deren Anwendung innerhalb des Bewertungsverfahrens werden vorgestellt.

Eine automatische Beurteilung der Gleichmäßigkeit bedingt, dass der Auswertesoftware die genaue Lage im 3D-Raum sowie Form und Größe der leuchtenden Fläche einer Signallichtfunktion bekannt sein muss, um autark bestimmen zu können, ob diese vollständig zu sehen ist und homogen erscheint. Dazu werden mithilfe eines Goniometers, orts aufgelöster Leuchtdichtemesstechnik und Methoden der perspektivischen Projektion mehrere Leuchtdichteverteilungen aufgenommen und unter Zuhilfenahme der zugehörigen Geometriedaten ausgewertet. Dadurch ist es möglich, Leuchtdichteverteilungen aus beliebigen Betrachtungsrichtungen mit der idealen leuchtenden Fläche zu vergleichen und über ausgewählte statistische Kriterien zu bewerten.

Des Weiteren wird ein Ansatz zur einfachen Darstellung der Messergebnisse präsentiert, welcher in seiner Form einer Lichtstärkeverteilung ähnelt und sich durch diese Einfachheit gut in einem Benchmarksystem einsetzen lässt.

# Abstract

Exterior lights are used to signal changes in velocity and direction to other road users and pedestrians. Besides this security aspect, the vehicle stylist uses the headlamps and tail lamps as an important design feature and a competitive differentiator in style communication. While previously, the daytime styling of the lights was important, recently, stylists have moved to provide a unique identification of the brand at twilight or night with a clearly defined lit area.

For this purpose, it is necessary that the lit area appears homogeneous from relevant observation directions. The homogeneity should not be rated only from a fixed point. The legal requirements are inadequate in respect to the homogeneity of tail lamps. Suitable methods to measure and rate the homogeneity must be developed. New possibilities in design and production engineering should be taken into account. Especially signal lamps with more lit areas, a high number of small optics for LED chambers or deep bezels are a big challenge for the measuring system and the associated rating methodology.

The investigation is focusing on an automated measurement and rating methodology for automotive signal lamps. Therefore, a precise definition of the term homogeneity and the rating of sensitive influencing factors are needed. Results of a psycho physical study about the acceptance of luminance differences within one lit area and between lit areas with different viewing angles and the implementation in the rating methodology will be shown.

An automatic detection and rating of the homogeneity requires that the 3D position and shape of the lit area are known. The software system must be able to assess whether the area can be seen completely and appears homogeneous. For this purpose, several luminance distributions are evaluated with the help of a goniometer, image-resolved luminance measurement techniques, CAD data of the lit area and methods of perspective projection. Thereby, it is possible to statistically evaluate luminance distributions from arbitrary observation directions and compare the shape to the ideal 3D surface.

A new approach to visualize measuring results in a simple way - similar to a light intensity distribution - will be presented. These results can now be used in a benchmarking system.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1	Ziel der Arbeit . . . . .	16
1.2	Untersuchungsgegenstand und Eingrenzung . . . . .	17
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Grundlagen - Stand der Technik</b>	<b>21</b>
2.1	Funktion der Kraftfahrzeugbeleuchtung . . . . .	21
2.2	Fahrzeugtechnische Vorschriften und Richtlinien . . . . .	22
2.2.1	Begriffsbestimmungen und Definitionen . . . . .	23
2.2.2	Photometrische Anforderungen an Schlussleuchten . . . . .	25
2.3	Visuelle Wahrnehmung von Signalleuchten . . . . .	26
2.3.1	Hellempfindung . . . . .	27
2.3.2	Sehleistung . . . . .	29
2.4	Projektive Geometrie . . . . .	32
2.5	Lochkameramodell . . . . .	34
2.5.1	Externe Transformation . . . . .	35
2.5.2	Perspektivische Transformation . . . . .	36
2.5.3	Interne Transformation . . . . .	37
2.5.4	Einfluss von Linsenverzerrungen . . . . .	38
2.6	Digitale Filter und Bildoperationen . . . . .	38
2.6.1	Glättungsfilter . . . . .	39
2.6.2	Kantendetektion . . . . .	40
2.6.3	Segmentierung . . . . .	40
2.6.4	Morphologische Operatoren . . . . .	42
2.7	Zusammenfassung . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit</b>	<b>45</b>
3.1	Begriffsdefinition im automobilen Umfeld . . . . .	45
3.1.1	Einzelne Lichtaustrittsfläche . . . . .	47
3.1.2	Mehrere Lichtaustrittsflächen . . . . .	48
3.2	Einflussfaktoren auf die Beurteilung . . . . .	48
3.2.1	Betrachtungsabstand . . . . .	50
3.2.2	Betrachtungsrichtung . . . . .	51
3.2.3	Abgrenzung der Lichtaustrittsfläche . . . . .	52
3.2.4	Abstand zwischen den Lichtaustrittsflächen . . . . .	53
3.3	Ausgewählte Ansätze zur softwarebasierten Bewertung . . . . .	54
3.3.1	Einzelne Lichtaustrittsfläche . . . . .	56
3.3.2	Mehrere Lichtaustrittsflächen . . . . .	59
3.4	Zusammenfassung . . . . .	60

<b>4</b>	<b>Lichttechnische Untersuchungen für die softwarebasierte Bewertung</b>	<b>63</b>
4.1	Untersuchungen zur Kontrastempfindlichkeit . . . . .	66
4.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	66
4.1.2	Untersuchungsergebnisse . . . . .	68
4.2	Untersuchungen zur Gradientenabhängigkeit . . . . .	69
4.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	70
4.2.2	Untersuchungsergebnisse . . . . .	71
4.3	Beurteilung verschiedener Optikkonzepte . . . . .	74
4.3.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	74
4.3.2	Untersuchungsergebnisse . . . . .	75
4.4	Erkennung der Signatur aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen . . . . .	77
4.4.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	77
4.4.2	Untersuchungsergebnisse . . . . .	78
4.5	Zusammenfassung . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Verfahren zur Bewertung der Gleichmäßigkeit</b>	<b>83</b>
5.1	Messung von Leuchtdichteverteilungen aus definierten Betrachtungsrichtungen	84
5.1.1	Bestandteile der Steuerungssoftware . . . . .	85
5.1.2	Aufbau und Ausrichtung der einzelnen Komponenten . . . . .	86
5.1.3	Vorbereitung und Messdurchführung . . . . .	88
5.2	Bestimmung der Lichtaustrittsflächen für eine automatisierte Auswertung . . . . .	90
5.2.1	Nutzung von Geometriedaten . . . . .	91
5.2.2	Perspektivische Projektion der Geometriedaten . . . . .	92
5.2.3	Positionierung der Daten über den Leuchtdichteverteilungen . . . . .	93
5.3	Auswertung der kombinierten Daten hinsichtlich der unterschiedlichen Kriterien	96
5.3.1	Programmablauf . . . . .	97
5.3.2	Visualisierung der Leuchtdichteverteilungen . . . . .	98
5.3.3	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	100
5.3.4	Erläuterungen zu den einzelnen Kriterien . . . . .	101
5.4	Zusammenfassung . . . . .	108
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>111</b>
6.1	Modell zur Beschreibung und Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .	111
6.2	Lichttechnische Untersuchungen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .	116
6.3	Erweiterte Kenntnis über die Informationen innerhalb einer Leuchtdichteverteilung . . . . .	118
6.4	Verfahren zur Messung und Bewertung von Signallichtfunktionen . . . . .	119
6.5	Übersichtliche Darstellung der Messergebnisse . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>123</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>125</b>
8.1	Anpassungen innerhalb der Gesetzgebung . . . . .	125
8.2	Texturen und Geometriedatenreproduktion . . . . .	126
8.3	Neue Lichtquellen und Materialien . . . . .	127
8.4	Simulation und Optimierung . . . . .	127
8.5	Benchmarksystem für Signalleuchten . . . . .	128

<b>A</b>	<b>Thesen</b>	<b>131</b>
<b>B</b>	<b>Anhang</b>	<b>133</b>
B.1	Photometrische Grundgrößen und Zusammenhänge . . . . .	133
B.2	Generierung von Geometriedaten im projektiven Raum . . . . .	135
B.3	Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1 . . . . .	137
B.4	Einzelergebnisse und Berechnungen zu Abschnitt 4.2 . . . . .	138
B.5	Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.3 . . . . .	140
B.6	Berechnungen zu Abschnitt 5.3.4 . . . . .	141
B.7	Messbereiche für alle Signallichtfunktionen . . . . .	142
<b>C</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>143</b>
C.1	Abbildungen . . . . .	143
C.2	Tabellen . . . . .	146
C.3	Abkürzungen . . . . .	147
C.4	Symbole . . . . .	149
C.5	Veröffentlichungen . . . . .	151
C.6	Literatur . . . . .	153





# 1 Einleitung

Die lichttechnischen Einrichtungen außen am Fahrzeug lassen sich entsprechend ihrer Anbau- position in Front- und Heckbeleuchtung unterteilen. Für Lichttechniker wird eine Aufteilung nach Scheinwerfer- und Signallichtfunktionen aus Sicht des Verfassers als sinnvoller erachtet. Wo genau liegt der Unterschied?

Als Scheinwerferlichtfunktionen werden diejenigen Lichtfunktionen der lichttechnischen Ein- richtungen am Fahrzeug bezeichnet, deren überwiegender Zweck die Beleuchtung des Ver- kehrsraumes ist, wie beispielsweise der Abblendlicht-, der Nebel-, aber auch der Rückfahr- scheinwerfer. Signallichtfunktionen, wie ein Schluss-, Brems- oder ein Tagfahrlicht wiederum, sollen vor allem gesehen werden. Ihr Hauptzweck besteht in der Erhöhung der Verkehrssicher- heit, durch Signalisierung des Vorhandenseins eines Fahrzeuges und dessen Richtungs- oder Geschwindigkeitsänderung.



**Abbildung 1.1:** *Der aktuellen Designsprache entsprechende Kfz-Signalleuchten mit eingeschalteter Schlusslichtfunktion. Eingezeichnet sind Effekte, die die wahrgenommene Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung beeinflussen können.*

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass eine Scheinwerferlichtfunktion die Sehaufgabe unterstützt, eine Signallichtfunktion aber vor allem gut gesehen und erkannt werden muss. Dies sind zwei gegensätzliche Disziplinen mit eigenen gesetzlichen Anforderungen und gestalterischen Ansprüchen, was an einem Beispiel zum Gütemerkmal Gleichmäßigkeit verdeutlicht werden soll. Dieses existiert zwar für beide Gruppen der lichttechnischen Einrichtungen, es beschreibt aber jeweils unterschiedliche Merkmalsausprägungen. Bei den Scheinwerferlichtfunktionen bezieht sich die Gleichmäßigkeit immer auf die Lichtverteilung auf der Straße. Für Signallichtfunktionen ist die Gleichmäßigkeit innerhalb oder zwischen sichtbaren leuchtenden Flächen gemeint, siehe dazu Abbildung 1.1. Dies hat auch messtechnische Unterschiede zur Folge. Die interindividuellen Unterschiede der Betrachter-zu-Straße-Positionen sind bei Bewertung der Gleichmäßigkeit von Scheinwerferlichtverteilungen sehr klein, weswegen die Auswertung über eine einzelne Beleuchtungsstärkeverteilung des Lichtes auf der Straße erfolgen kann [Kle03, Dah01, Hof03, Huh96]. Für Signallichtfunktionen erweist sich das als deutlich schwieriger, da aufgrund der kontinuierlich variierenden Abstände und Winkel zwischen fahrenden Fahrzeugen eine Vielzahl von Betrachter-zu-Leuchte-Positionen mit berück-

sichtigt werden müssen. Daraus ergibt sich ein weiteres Problem. Innerhalb der fahrzeugtechnischen Normen sind die Beleuchtungsstärke  $E$  und die Lichtstärke  $I$  als Messgrößen definiert [ECE006, ECE007, ECE112]. Beiden fehlt für eine wahrnehmungsbasierte Bewertung des Helligkeitseindrucks aber die Information, von welchen Flächen (Ort, Größe, Orientierung) das Licht ausgestrahlt wird. Damit ist eine Bewertung der Gleichmäßigkeit ausgeschlossen. Eine lichttechnische Grundgröße, welche die Fläche mit berücksichtigt, ist die Leuchtdichte  $L$ . Sie ist definiert als der Lichtstromanteil  $d\Phi$ , der in eine vorgegebene Richtung  $(\vartheta, \varphi)$  in ein Raumwinkelement  $d\Omega_1$ , bezogen auf eine scheinbar leuchtende Fläche  $(dA_1 \cos(\vartheta))$ , einfällt. Oder formal ausgedrückt:

$$L(x, y, z, \vartheta, \varphi) = \frac{d^2\Phi}{dA_1 \cdot \cos(\vartheta) \cdot d\Omega_1} = \frac{dI(\vartheta, \varphi)}{dA_1 \cdot \cos(\vartheta)}. \quad (1.1)$$

Die Leuchtdichte stellt damit aus Sicht vieler Autoren die maßgebliche Größe für eine sinnvolle Bewertung von Signallichtfunktionen dar [Rip01a, Arm01, Koe08, Kal09].

Zusätzlich zur Funktionalität sind die gestalterischen Anforderungen zu betrachten. Bei Signallichtfunktionen, wie dem Schluss- und Tagfahrlicht, steht mittlerweile auch die Nachterscheinung im Fokus, also die Wirkung der Signalleuchte im eingeschalteten Zustand bei Dämmerung oder Nacht. Die Signallichtfunktionen werden somit auch in der Nacht zum Designelement und Differenzierungsmerkmal des Fahrzeugs. Dies stellt die Lichttechniker und Konstrukteure vor neue Herausforderungen. Es scheint so als würde die Kreativität der Designer mit den gestiegenen konstruktiven und technischen Möglichkeiten zunehmen. Zusätzlich existiert der Drang der Fahrzeughersteller zu immer mehr Produkten auf immer neuen Absatzmärkten. Da die Leuchtenentwicklung außerdem maßgeblich durch ökonomische Interessen geprägt ist, kann das hehre Ziel aller beteiligten Parteien, kostenneutral, mehr Signalleuchten nach höchsten Ansprüchen an die Lichttechnik, Gestaltung und die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung herzustellen, nur unter Verwendung neuer Methoden erreicht werden. Speziell für das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit fehlen quantitative Anforderungen, um Fortschritte oder auch eine Stagnation während der Leuchtenentwicklung objektiviert festhalten zu können. Im Moment erfolgt eine Bewertung der Gleichmäßigkeit unter undefinierten Umgebungsbedingungen und unterliegt damit stark den vorliegenden örtlichen Gegebenheiten und der aktuellen mentalen Verfassung der Bewertenden. Dies minimiert die Aussagekraft drastisch. Benötigt wird hier ein reproduzierbares Verfahren zur quantitativen Bewertung der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten, um beispielsweise Fortschritte der einzelnen Meilensteine in der Entwicklung einer Leuchte sichtbar oder unterschiedliche Leuchten vergleichbar zu machen.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und anschließenden Bewertung von Kfz-Signalleuchten aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen auf Basis der lichttechnischen Größe Leuchtdichte. Die Methode soll sich an den Erkenntnissen zur menschlichen Wahrnehmung orientieren, reproduzierbar, anwenderfreundlich und gut zu erweitern sein, um auch in Zukunft den wachsenden Designansprüchen gerecht zu werden. Zur Erreichung des Ziels erfolgt eine umfangreiche Analyse des Gütemerkmals Gleichmäßigkeit von Signalleuchten und dessen Einflussfaktoren. Zur Ermittlung von Kennzahlen zur objektivierten Bewertung der Gleichmäßigkeit, wird eine Probandenstudie durchgeführt. Die gewonnenen

Ergebnisse werden aufbereitet und innerhalb der Messsoftware für die Bewertung nutzbar gemacht. Das Endergebnis der Bewertung soll übersichtlich, einfach und vergleichbar gestaltet sein, damit der Leuchtenentwicklungsprozess sinnvoll unterstützt, eine Diskussion möglich und ein Benchmarksystem, zum Vergleich von unterschiedlichen Leuchten oder Entwicklungsständen, eingesetzt werden kann.

## 1.2 Untersuchungsgegenstand und Eingrenzung

Aus dem zuvor definierten Ziel ergeben sich nachfolgende Punkte als Untersuchungsgegenstand der Arbeit:

- **Modell zur Beschreibung und Bewertung der Gleichmäßigkeit**

Für alle aktuellen und zukünftigen Leuchtdesigns gilt es, eine Möglichkeit zu finden, die geforderte Gleichmäßigkeit innerhalb und zwischen leuchtenden Flächen zu messen und quantitativ zu bewerten. Zu diesem Zweck muss ein Modell zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit erarbeitet, die Einflussfaktoren identifiziert und auch deren Sensibilität berücksichtigt werden.

- **Lichttechnische Untersuchungen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit**

Als Grundlage für das Modell, wird eine psychophysikalische Untersuchung zur Bewertung der Nachterscheinung von Kfz-Signalleuchten durchgeführt, mit dem Ziel, Kennzahlen zur objektivierten Bewertung der Leuchten hinsichtlich der wahrgenommenen Helligkeit und Gleichmäßigkeit zu erzeugen. Eine Rückführung des Vorgangs der visuellen Bewertung der Gleichmäßigkeit einer untersuchten Lichtfunktion auf messbare, photometrische Eigenschaften soll erreicht werden.

- **Erweiterte Kenntnis über die Ortsinformationen innerhalb einer Leuchtdichte-  
verteilung**

Zur Bewertung der Gleichmäßigkeit einer Leuchte, muss der Software der geometrische Bereich der Nachtsignatur innerhalb der Leuchtdichteverteilungen bekannt sein, ähnlich der Vorgabe von Feldern auf der Fahrspur bei der Bewertung der Gleichmäßigkeit von Scheinwerfern [Kle03, Dah01]. Im hier untersuchten Fall der Signalleuchten können zusätzliche Informationen beispielsweise direkt aus den Konstruktionsdaten der Leuchten entnommen werden. Die Daten müssen für eine ordnungsgemäße Verwendung entsprechend vorverarbeitet werden.

- **Verfahren zur Messung und Bewertung von Signallichtfunktionen**

Der aktuell gelebte Leuchtenentwicklungsprozess bietet bereits Methoden zur Erzeugung von Leuchtdichteverteilungen aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen in der Simulation [Här09]. Lediglich der Abgleich mit echter Hardware erweist sich aktuell als schwierig, da Prototypen und Serienleuchten nur mit immensem zeitlichen Aufwand ebenfalls in diese Darstellungsform gebracht werden können. Es wird untersucht, inwieweit vorhandene Messtechnik nutzbar ist und sinnvoll eingesetzt werden kann. Idealerweise lässt sich ein neues Verfahren ohne große zusätzliche zeitliche oder monetäre Aufwendungen in den bestehenden Entwicklungsprozess integrieren. Messung und Justage sollten einfach gestaltet sein und möglichst vollständig automatisch ablaufen, um den Aufwand gering zu halten und Fehlerquellen zu minimieren, da aufgrund der vielen

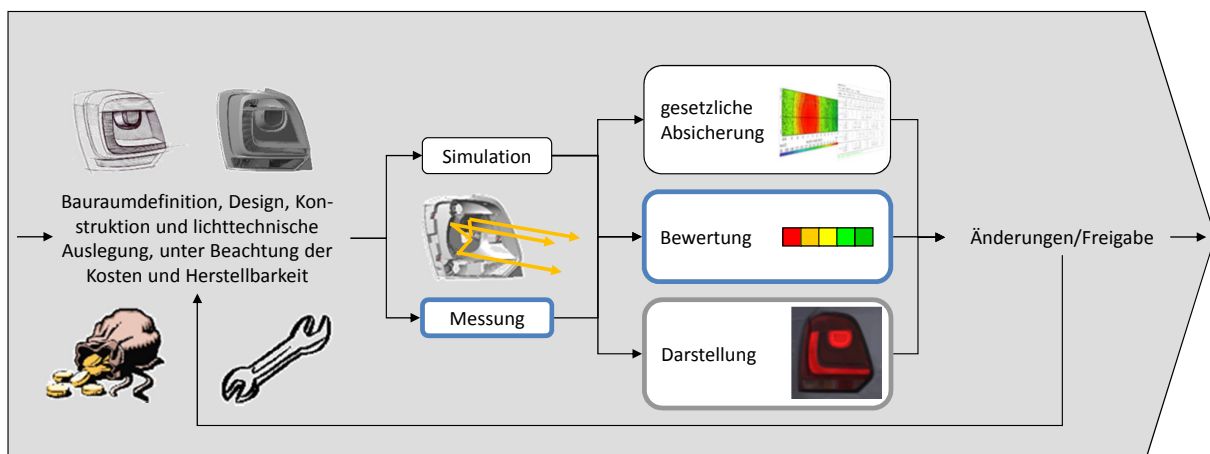
Betrachter-zu-Leuchte-Positionen sehr viele Betrachtungsrichtungen und damit Leuchtdichteverteilungen berücksichtigt werden müssen, siehe Abschnitt 1.

- **Übersichtliche Darstellung der Messergebnisse**

Nach Erzeugung der richtungsabhängigen Leuchtdichteverteilungen einer Signalleuchte und der Separierung der Bildinformationen über die Überlagerung mit den Geometrieinformationen der Leuchte, liegen sehr große Datenmengen vor, die es auszuwerten gilt. Als Ergebnis davon ist eine kompakte, leicht verständliche und vergleichbare Darstellung gewünscht, in der alle relevanten Informationen der Bewertung enthalten sind. Dies ist vor allem im Hinblick auf ein zukünftiges Benchmarksystem, zur Bewertung von unterschiedlichen Entwicklungsständen einer Leuchte, von besonderem Interesse.

Zur Wahrung eines Höchstmaßes an Übersichtlichkeit wird die folgende thematische Eingrenzung getroffen. In dieser Arbeit stehen die Kfz-Signallichtfunktionen im Fokus, also die Lichtfunktionen, welche der Signalisierung dienen und somit das Leuchten und Gesehen werden zum Zweck haben. Die nachfolgende Ausarbeitung bezieht sich außerdem speziell auf die Schlusslichtfunktion von Fahrzeugen. Das neue Bewertungsverfahren ist nach Anpassungen aber analog auf die übrigen Signallichtfunktionen anwendbar, insofern für diese eine gleichmäßige Ausleuchtung gefordert ist. Hierbei können jedoch weitere psychophysikalische Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Blendung, zu berücksichtigen sein.

Obwohl die Simulation ein fester Bestandteil im Leuchtenentwicklungsprozess ist, steht die Bewertung von simulierten Leuchtdichtebildern nicht im Vordergrund, siehe Abbildung 1.2. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die neue Bewertungsmethode ebenfalls innerhalb der Simulation zum Einsatz kommen soll und dort noch geringere geometrische Abweichungen erwartet werden als bei der Messung, da die erzeugten Leuchtdichteverteilungen und die nötigen Geometriedaten derselben Software entstammen und die in Übereinstimmung zu bringenden Koordinatensysteme eindeutig beschrieben sind.



**Abbildung 1.2:** Einordnung der Bestandteile dieser Arbeit in den Leuchtenentwicklungsprozess, unterschieden in

- ... theoretische Betrachtung und praktische Umsetzung der Bewertung der Gleichmäßigkeit von Leuchten mittels eines neuen Verfahrens und
- ... praktische Umsetzung eines einfachen Verfahrens zur Darstellung von Leuchtdichteverteilungen am Bildschirm, ohne weiterführende theoretische Untersuchungen.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass innerhalb der Arbeit auch eine Methode zur Darstellung der gemessenen Leuchtdichteverteilungen vorgestellt wird. Eine große Aufgabe besteht dabei in der Skalierung der Leuchtdichtewerte einer Schlusslichtverteilung (hohe Werte und hoher Dynamikumfang in den Daten) zur Darstellung auf einem üblichen Anzeigemedium (niedrige Werte und niedriger Dynamikumfang). In Abschnitt 5.3.2 ab Seite 98 wird das angewendete Verfahren zur Skalierung der Leuchtdichtewerte beschrieben, im Rahmen der Arbeit jedoch nicht näher untersucht.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

In Abbildung 1.3 wird die Struktur der Arbeit gezeigt. Daran anschließend werden die einzelnen Kapitel erläutert.

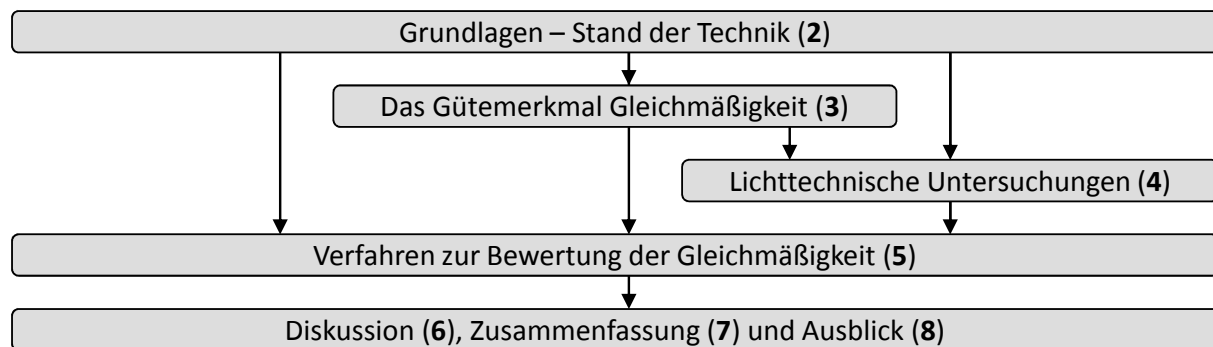


Abbildung 1.3: Struktur der vorliegenden Arbeit

- **Kapitel 2: Grundlagen - Stand der Technik**

Zu Beginn der Arbeit werden alle wichtigen Grundlagen bereitgestellt. Es werden die Themenfelder Kraftfahrzeugbeleuchtung, visuelle Wahrnehmung, perspektivische Projektion und digitale Bildverarbeitung vorgestellt und deren Bedeutung für das Thema der Arbeit aufgezeigt.

- **Kapitel 3: Das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit**

Im Mittelpunkt von Kapitel 3 steht das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit als sowohl sicherheitsrelevantes wie auch ästhetisches Merkmal der sichtbaren leuchtenden Flächen von Signalleuchten. Es wird auf die Messung und Bewertung der Gleichmäßigkeit eingegangen und es werden die Einflussfaktoren, welche die Wahrnehmung beeinträchtigen, identifiziert. Die Relevanz für eine Bewertung aus mehreren Betrachtungsrichtungen, wichtige Aspekte für die Umsetzung eines automatisierten Mess- und Bewertungsverfahrens sowie die verwendeten Bewertungsmodelle werden beschrieben.

- **Kapitel 4: Lichttechnische Untersuchungen für die softwarebasierte Bewertung**

In Kapitel 4 wird die psychophysikalische Untersuchung vorgestellt. Diese unterteilt sich in zwei große Hauptuntersuchungen. Zum einen wird der Einfluss der Umgebungshelligkeit auf die Leuchtenbewertung untersucht, zum anderen werden verschiedene Bewertungen der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten durchgeführt. Bereits während der Durchführung der Untersuchung steht vor allem die Vergleichbarkeit von Probanden- und Softwarebewertung im Zentrum des Interesses.

- **Kapitel 5: Verfahren zur Bewertung der Gleichmäßigkeit**

Es werden die Hauptbestandteile der Messeinrichtung und der zugehörigen Software aufgezeigt. Die einzelnen Bestandteile des Kapitels lassen sich dabei in eine Datenvorverarbeitung (Eingabe und Erzeugung von Daten und Parametern), Datenverarbeitung (Bewertung und Visualisierung der Leuchtdichteverteilungen) und eine Datennachbearbeitung (Auswertung und Präsentation der Ergebnisse) unterteilen.

- **Kapitel 6: Diskussion**

Dieses Kapitel dient zur Darstellung der Ergebnisse und deren kritischer Diskussion. Es erfolgt ein Abgleich mit den Anforderungen und dem Ziel der Arbeit.

- **Kapitel 7: Zusammenfassung**

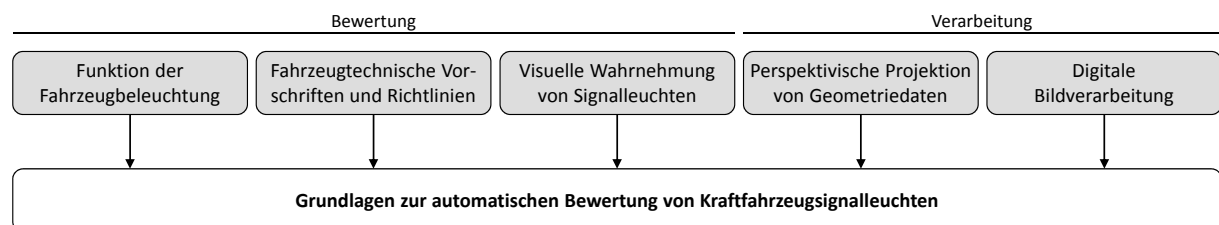
Im Fazit der Arbeit werden die einzelnen Ergebnisse zusammenfassend dargelegt.

- **Kapitel 8: Ausblick**

Das letzte Kapitel beschließt die Arbeit mit einem Ausblick auf weitere Anpassungen und vor allem mögliche neue Einsatzgebiete des Bewertungsverfahrens.

## 2 Grundlagen - Stand der Technik

Das nachfolgende Kapitel soll die Grundlagen erläutern und zum Verständnis dieser Arbeit beitragen. Es wird auf die Funktion der Kraftfahrzeugbeleuchtung, die gesetzlichen Vorschriften für die lichttechnischen Einrichtungen am Fahrzeug, die physiologische Wahrnehmung von Signalleuchten, die nötigen Aspekte der perspektivischen Projektion von 3D-Geometriedaten am Beispiel des Lochkameramodells und die digitale Bildverarbeitung als Werkzeug zur Auswertung von Leuchtdichteverteilungen eingegangen, siehe Abbildung 2.1.



**Abbildung 2.1:** Hauptbestandteile des Kapitels, die Grundlage für eine automatische Bewertung von Kfz-Signallichtfunktionen sind.

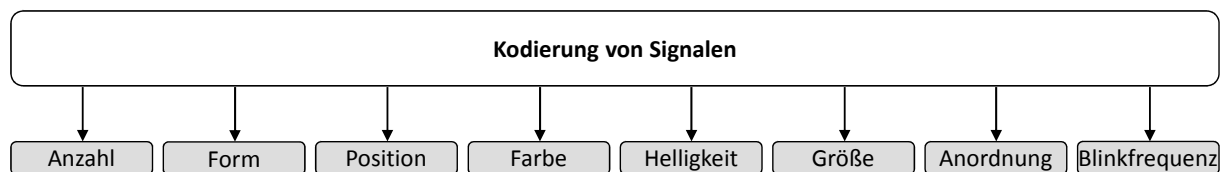
Die photometrischen Grundgrößen, die für diese Arbeit von Relevanz sind, werden im Anhang B.1 ab Seite 133 zusammengefasst. Ergänzende Erläuterungen zu den verwendeten Abkürzungen (C.3, S. 147) und Symbolen (C.4, S. 149) befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

### 2.1 Funktion der Kraftfahrzeugbeleuchtung

Im deutschen Straßenverkehrsraum bewegen sich 52 Mio. Fahrzeuge [Sta10]. Da die Fortbewegung im Straßenverkehr dank des Autos mit hoher Geschwindigkeit erfolgt, ist die Wahrnehmung des Menschen bei der Interpretation der aktuellen Verkehrslage besonderen Aufgaben ausgesetzt. Die am Fahrzeug verbauten lichttechnischen Einrichtungen dienen der Erhöhung der Verkehrssicherheit und sollen den Wahrnehmungsprozess unterstützen. Gerade in der Nacht ermöglichen meist erst die Beleuchtungseinrichtungen eines Fahrzeugs dessen frühzeitige Detektion. Sie stellen somit ein wichtiges Werkzeug visueller Informationsübermittlung und einen integralen Bestandteil der sicheren Fortbewegung dar. Mithilfe der Fahrzeugbeleuchtung werden unter anderem Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen von vorausfahrenden oder entgegenkommenden Fahrzeugen angezeigt. Es soll die Zeit, die den anderen Verkehrsteilnehmern für eine angemessene Reaktion auf den geänderten Fahrzeugzustand zur Verfügung steht, vergrößert werden. Dafür werden eindeutig kodierte Lichtsignale zur Unterstützung des Informationsbedarfs abgesendet. Die Signalisation sollte sowohl am Tag als auch in der Nacht mit sehr hoher Qualität erfolgen, da der Mensch 90% seiner Informationen visuell wahrnimmt [Eck93, RDO<sup>+</sup>08] und die Beleuchtungseinrichtungen somit eine wesentliche Funktion haben.



In Abbildung 2.2 werden die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale für die Kodierung von Signalleuchten gezeigt. Für eine widerspruchsfreie Interpretation sind vor allem die Farbe und die Form eines Objektes entscheidend, berücksichtigt durch unterschiedliche Lichtfarben, Anbaupositionen und Größen der Beleuchtungseinrichtungen [Kal09]. Für weitere Details sei auf [Koe08] verwiesen, da, wie bereits in der Einleitung dargestellt, in dieser Arbeit die stationäre Bewertung von Signalleuchten im Fokus steht. Eine einwandfreie Unterscheidung von Signalen kann indes nur erreicht werden, wenn eine gleichmäßig ausgeleuchtete Lichtaustrittsfläche vorliegt, womit die vorrangig ästhetisch geführte Betrachtung des Kriteriums Gleichmäßigkeit innerhalb der Arbeit durchaus für die Sicherheit im Straßenverkehr relevant ist. Weitere Ausführungen zur Gleichmäßigkeit sind in Kapitel 3 ab Seite 45 zu finden.



**Abbildung 2.2:** Darstellung der relevanten Unterscheidungsmerkmale für die Kodierung von Signalleuchtfunktionen.

Neben dem genannten Sicherheitsaspekt dienen die Scheinwerfer und Leuchten eines Fahrzeugs dem Designer als wichtiges Gestaltungselement, um seiner gewünschten Formsprache Ausdruck zu verleihen. Die Scheinwerfer und Leuchten eines Fahrzeugs stellen somit ein entscheidendes Differenzierungsmerkmal zwischen unterschiedlichen Automobilherstellern dar, welches die Kaufentscheidung der Kunden beeinflussen kann. Während früher vor allem das Design der Beleuchtungseinrichtungen bei Betrachtung am Tag im Fokus lag, soll mittlerweile auch in der Nacht über eine definierte und hochwertig anmutende Lichtsignatur, also die sichtbare leuchtende Fläche einer Signalfunktion, eine eindeutige Identifikation des Automobilherstellers ermöglicht werden.

## 2.2 Fahrzeugtechnische Vorschriften und Richtlinien

In diesem Abschnitt werden die gesetzlichen Anforderungen an die Beleuchtungseinrichtungen am Fahrzeug vorgestellt.

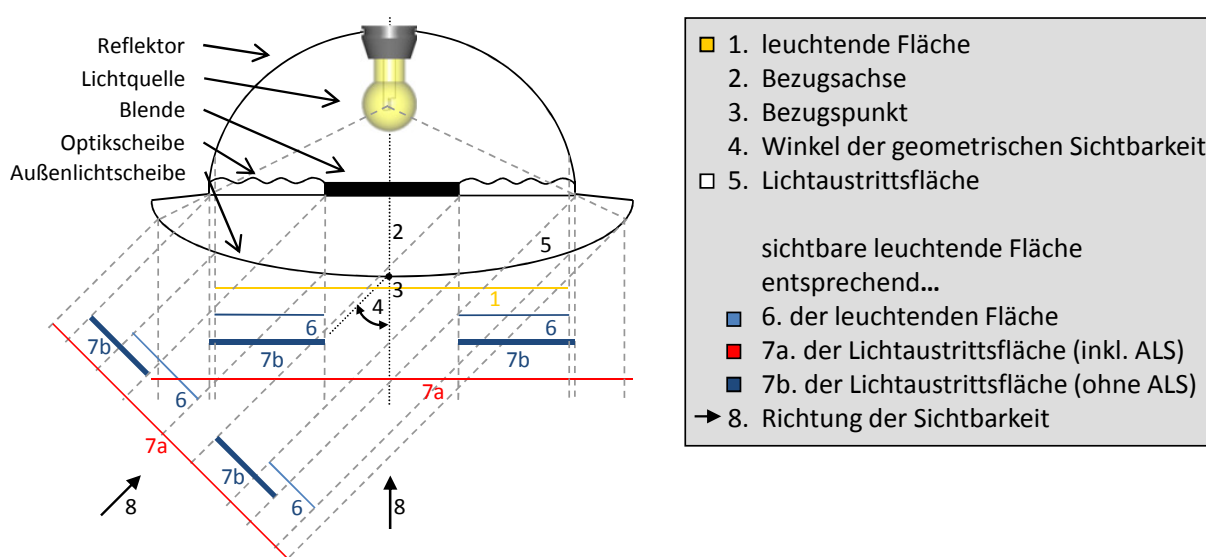
In der Entwicklung der Gesetzgebung haben sich in den letzten Jahrzehnten im Wesentlichen zwei Zulassungsbereiche herausgebildet. In den USA müssen die SAE-Normen, die Normen der „Society of Automotive Engineers“, der amerikanischen Bundesbehörde für Straßen- und Verkehrssicherheit „National Highway Traffic Safety Administration“ (NHTSA) eingehalten werden. Diese sind in den Zulassungsgesetzen „Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations“ (FMVSS) niedergeschrieben. Für Beleuchtungseinrichtungen sind die lichttechnischen Anforderungen im Standard 108 definiert [FMVSS108]. Es werden Vorgaben für die räumliche Lichtstärkeverteilung, die Größe und Lage der leuchtenden Flächen und die zulässigen Lichtfarben getroffen.

Für die Bestimmungen im europäischen Raum ist die „Economic Commission for Europe“ (ECE), die Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen, eine von fünf regionalen Wirtschaftskommissionen, zuständig. Die Kommission dient der wirtschaftlichen Zusammenarbeit

der Mitgliedsstaaten. Sie hat 1995 ein Übereinkommen geschlossen, welches den Erlass einheitlicher technischer Vorschriften für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen, Teilen und Ausrüstungsgegenständen von Kraftfahrzeugen ermöglicht. Entsprechend dem technischen Fortschritt werden die ECE-Regelungen ständig dem jeweiligen Stand der Technik angepasst und durch die Vertragsparteien übernommen, vgl. [MZ07]. Im Kontext der Arbeit wird im Speziellen auf den europäischen Zulassungsbereich, die photometrischen Anforderungen an Schlussleuchten und die Definition und Bestimmung von leuchtenden Flächen und Lichtaustrittsflächen eingegangen.

## 2.2.1 Begriffsbestimmungen und Definitionen

In der ECE-Regelung Nr. 48 ist der Anbau der Lichtsignaleinrichtungen festgelegt [ECE048]. Um den Abstand der leuchtenden Fläche einer Lichtfunktion zu den Außenkanten des Fahrzeugs oder die Anbauhöhe über dem Boden zu prüfen, ist eine eindeutige Definition der Begrenzungen der leuchtenden Fläche nötig. Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten, in der ECE-Regelung Nr. 48 getroffenen, Begriffsbestimmungen und Definitionen aufgezeigt. Die Begrifflichkeiten werden an der in Abbildung 2.3 gezeigten Leuchte beschrieben.



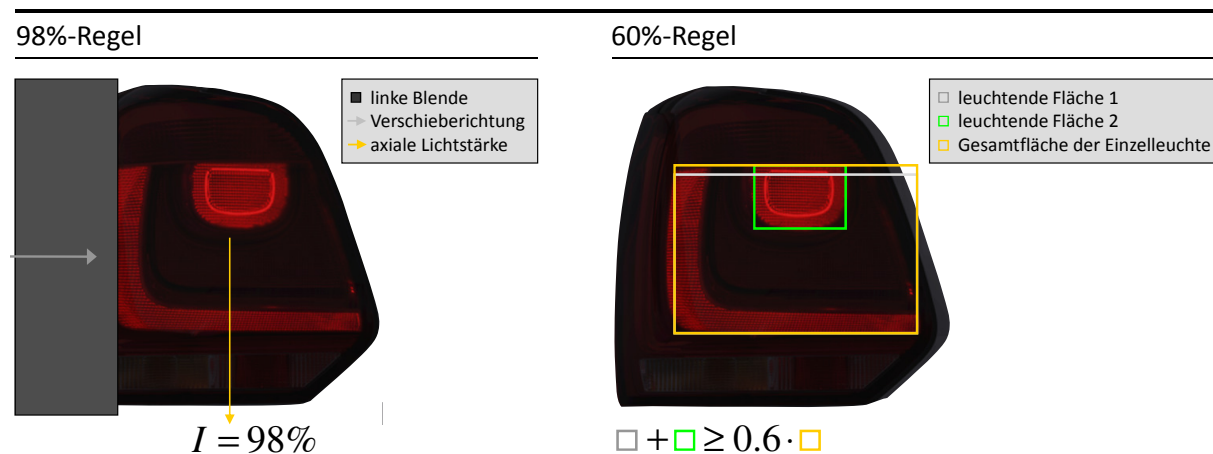
**Abbildung 2.3:** Darstellung der für eine photometrische Bewertung relevanten Bestandteile einer Kfz-Signalleuchte nach [ECE048].

Die *Lichtaustrittsfläche* (Nr. 5) einer Lichtsignaleinrichtung ist die gesamte Außenfläche oder ein Teil der Außenfläche der Außenlichtscheibe (ALS) [ECE048, Abschnitt 2.8].

Die *leuchtende Fläche* (Nr. 1) einer Signalleuchte ist dagegen die Parallelprojektion der Leuchte auf eine zu ihrer Bezugsachse (Nr. 2) senkrecht liegenden Ebene, die die Außenseite der Außenlichtscheibe der Leuchte berührt. Die Projektion wird durch die in dieser Ebene liegenden Ränder der Blenden begrenzt, wobei jede einzelne Blende die Gesamtlichtstärke  $I$  in Bezugsrichtung auf 98% reduziert, siehe Abbildung 2.4. In der Praxis erfolgt eine Verschiebung der Blenden von außerhalb der Leuchte in Richtung Leuchtschwerpunkt, bis sich die gemessene Lichtstärke auf 98% ihres Ausgangswertes herabgesetzt hat. Zur Bestimmung der unteren, der oberen und der seitlichen Begrenzung der leuchtenden Fläche werden nur Blenden mit

horizontalem oder vertikalem Rand verwendet. Diese Begrenzungen werden genutzt, um den Abstand zu den Außenkanten des Fahrzeugs und die Höhe über dem Boden nachzuprüfen. Für andere Verwendungen der leuchtenden Fläche, beispielsweise der Bestimmung des Abstandes zwischen zwei Leuchten oder zwei Lichtfunktionen, ist die Form des Umfangs der leuchtenden Fläche zu verwenden. Dabei müssen die Blenden parallel bleiben. Es dürfen jedoch andere Ausrichtungen verwendet werden [ECE048, Abschnitt 2.9.2].

Die *sichtbare leuchtende Fläche* in einer bestimmten Betrachtungsrichtung ist entweder die Parallelprojektion der Umrandung der leuchtenden Fläche auf der Außenfläche der Außenlichtscheibe (Nr. 6) oder die Lichtaustrittsfläche (Nr. 7a). Sie ist auf einer Ebene, die senkrecht zur Betrachtungsrichtung liegt und den äußersten Punkt der ALS berührt, definiert [ECE048, Abschnitt 2.10]. Für die meisten Leuchten entspricht die tatsächlich sichtbare leuchtende Fläche eher der Lichtaustrittsfläche als der leuchtenden Fläche, insofern aus einer Betrachtungsrichtung nahe oder gleich der Bezugsachse geschaut wird. Je weiter jedoch die Betrachtungsrichtung von der Bezugsachse entfernt ist, desto weniger entspricht die Parallelprojektion der sichtbaren leuchtenden Fläche auf der ALS der tatsächlich sichtbaren leuchtenden Fläche. Dieser Fall kann dann auftreten, wenn eine nicht-strukturierte ALS zum Einsatz kommt, da diese die Ausbreitung des Lichtes nicht maßgeblich beeinflusst. Dies erweist sich speziell bei kamerabasierten Verfahren zur Bestimmung der sichtbaren leuchtenden Fläche als unbrauchbar, da die auf die ALS projizierten Flächen in keinem Fall in den Bilddaten als leuchtende Fläche wiedergefunden werden können. Für diesen Fall ist mit der Gesetzesänderung 4 eine weitere Definition zur Beschreibung hinzugekommen, welche explizit nicht-strukturierte ALS als Lichtaustrittsfläche ausschließt und damit auch für große seitliche Betrachtungsrichtungen die tatsächlich sichtbare leuchtende Fläche treffend beschreibt (Nr. 7b) [ECE048S4]. In allen nachfolgenden Abschnitten der Arbeit ist mit Lichtaustrittsfläche (LF) die sichtbare leuchtende Fläche entsprechend der Lichtaustrittsfläche nach Nr. 7b gemeint.



**Abbildung 2.4:** links: Bestimmung der linken Blendenposition über die 98%-Regel, nach [ECE048]; rechts: Interpretation der Zusammenfassung mehrerer leuchtender Flächen mit minimalem Abstand  $d > 15$  mm zu einer Einzelleuchte unter Anwendung der 60%-Regel, am Beispiel einer aktuellen Kfz-Signalleuchte, nach [ECE048].

Die *Winkel der geometrischen Sichtbarkeit* (Nr. 4) grenzen den Bereich des Mindestraumwinkels ab, innerhalb dessen die sichtbare leuchtende Fläche der Leuchte tatsächlich sichtbar sein muss. Dieser Raumwinkelbereich wird durch die Segmente der Kugel abgegrenzt, deren Mittelpunkt mit dem Bezugspunkt (Nr. 3) der Leuchte zusammenfällt und deren Äquator parallel zum

Boden verläuft. Die Segmente werden von der Bezugsachse aus bestimmt. Die horizontalen Winkel  $H$  entsprechen der geographischen Länge und die vertikalen Winkel  $V$  der geographischen Breite [ECE048, Abschnitt 2.13]. Innerhalb des Raumwinkelbereichs gelten in jedem Punkt die Anforderungen an die minimalen Lichtstärken von  $I \geq 0,05 \text{ cd}$ , siehe Abbildung 2.5 rechts.

Für den Automobilhersteller ist außerdem die Definition einer *Einzelleuchte* von besonderer Relevanz. Um den gesetzlichen und gestalterischen Anforderungen gerecht zu werden, besteht eine einzelne Lichtfunktion häufig aus mehreren leuchtenden Flächen. Damit diese im Verbund die photometrischen Anforderungen erfüllen können, müssen sie eine der nachfolgenden Bedingungen erfüllen. Die Einzelleuchte ist eine Einrichtung mit einer Lichtsignalfunktion, mit einer oder mehrerer Lichtquellen und einer sichtbaren leuchtenden Fläche in Richtung der Bezugsachse, die aus einer durchgehenden Fläche oder aus zwei oder mehreren getrennten Flächen zusammengesetzt sein kann. Des Weiteren ist jede Kombination von zwei unabhängigen Leuchten gleicher Funktion wenn sie so angebaut sind, dass die Projektion ihrer sichtbaren leuchtenden Flächen in Richtung der Bezugsachse mindestens 60% der Fläche des kleinstmöglichen umschreibenden Rechtecks ausfüllt, eine Einzelleuchte, siehe Abbildung 2.4 rechts. Es handelt sich außerdem um eine Einzelleuchte, wenn der minimale Abstand zwischen zwei unabhängigen Leuchten, der rechtwinklig zur Bezugsachse gemessen wird, 15 mm nicht überschreitet [ECE048S4, Abschnitt 2.16.1]. In Abschnitt 3.2.4, ab Seite 53, wird eine Methode zur automatisierten Bestimmung des minimalen Abstandes zwischen zwei sichtbaren leuchtenden Flächen entsprechend der Lichtaustrittsflächen vorgestellt.

## 2.2.2 Photometrische Anforderungen an Schlussleuchten

In dieser Arbeit ist die ECE-Regelung Nr. 7 von besonderer Relevanz. Denn in dieser werden einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Begrenzungs-, Schluss-, Brems- und Umrissleuchten für Kraftfahrzeuge (mit Ausnahme von Krafträdern) und ihrer Anhänger definiert [ECE007]. Es werden Festlegungen zu den photometrischen Prüfverfahren, der Wärmebeständigkeit der Leuchte, der Farbe des ausgestrahlten Lichts, der verwendbaren Lichtquellen und der Prüfzeichen für die Leuchte getroffen. Tabelle 2.1 zeigt die Anforderungen der Gesetzgebung in Form von minimalen und maximalen Lichtstärken in definierten Horizontal- und Vertikalwinkeln für eine Schlussleuchte.

**Tabelle 2.1:** Messpunkte der ECE-Regelung Nr. 7 für eine Schlussleuchte, bei einer Leuchtenanbauhöhe  $\leq 750 \text{ mm}$  entfällt die letzte Zeile, nach [ECE007].

■ ... Maximum und

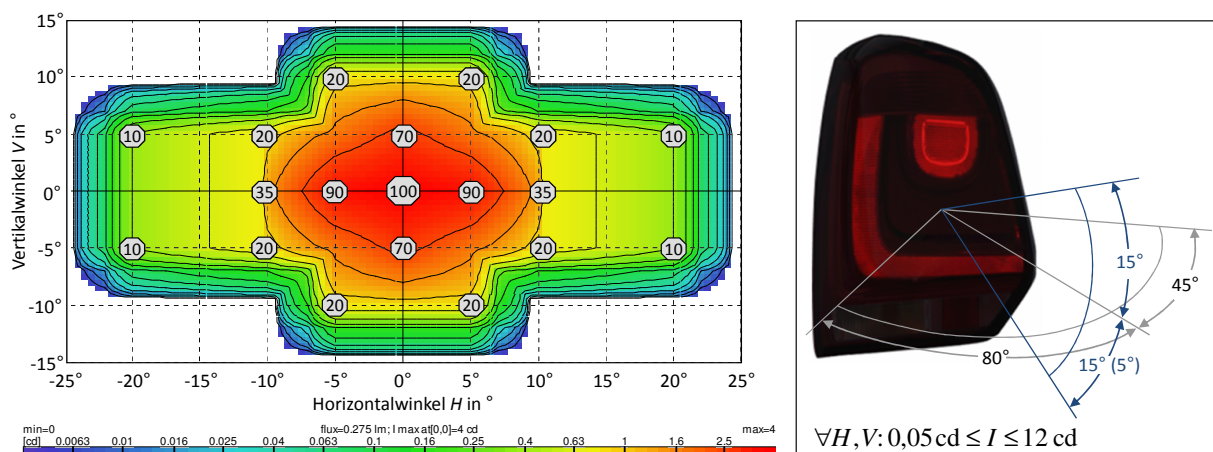
■ ... Minimum der Lichtstärke, jeweils in cd.

$H \setminus V$	$-20^\circ$	$-15^\circ$	$-10^\circ$	$-5^\circ$	$0^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$	$15^\circ$	$20^\circ$
$10^\circ$				12 0,8	12 0,8	12 0,8			
$5^\circ$	12 0,4		12 0,8		12 2,8		12 0,8		12 0,4
$0^\circ$			12 1,4	12 3,6	12 4,0	12 3,6	12 1,4		
$-5^\circ$	12 0,4		12 0,8		12 2,8		12 0,8		12 0,4
$-10^\circ$				12 0,8	12 0,8	12 0,8			

In Abbildung 2.5 ist eine räumliche Lichtstärkeverteilung der Minimalanforderungen für ein Schlusslicht nach ECE-Regelung Nr. 7 dargestellt. Zusätzlich zu den geforderten Lichtstärken in den definierten horizontalen und vertikalen Raumwinkeln ist in der Regelung außerdem ein Mindestwinkelbereich von

$$\begin{aligned} -45^\circ \leq H \leq 80^\circ, \\ -15^\circ (-5^\circ) \leq V \leq 15^\circ \end{aligned}$$

definiert, in dem die Lichtstärke in jedem Punkt mindestens 0,05 cd betragen muss. Bei einer Leuchtenanbauhöhe  $\leq 750$  mm erhöht sich der vertikale Mindestwinkel auf  $V_{\min} = -5^\circ$ .



**Abbildung 2.5:** links: idealisierte Schlusslichtstärkeverteilung mit den geforderten Mindestlichtstärken; rechts: Mindestwinkel der räumlichen Lichtverteilung zur Absicherung der Sichtbarkeit einer links am Fahrzeug angebrachten Leuchte.

(20) ... Messpunkte der vereinheitlichten räumlichen Lichtverteilung für Signalleuchten, mit den Anforderungen an die minimale Lichtstärke, jeweils in Prozent vom Maximum, im Falle der Schlusslichtverteilung von  $I_{\min} = 4 \text{ cd} \hat{=} 100\%$ .

Im Fernbereich stellt die Lichtstärke die maßgebliche Größe zur Beurteilung einer Signalleuchte dar. Für den Nahbereich, der bis zu einem Betrachtungsabstand von 25 m [Koe08] bis 100 m [Arm01] gilt, existieren keine gesetzlichen Vorschriften. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der heutigen Verkehrsdichte die Leuchtdichte die maßgebliche Größe für die Bestimmung des Helligkeitseindrucks ist [Rip01a].

Innerhalb der gesetzlichen Anforderungen für Kfz-Signalleuchten existiert keine Definition für die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung von Lichtaustrittsflächen. Da die Gleichmäßigkeit jedoch sowohl aus Gründen der Sicherheit als auch aus ästhetischen Betrachtungsweisen heraus relevant ist, werden im Rahmen dieser Arbeit ein Modell und eine Messmethode zur Beschreibung dieses Gütemerkmals entworfen. Dabei soll die starke Abhängigkeit des Gleichmäßigkeitseindrucks vom Betrachtungswinkel als einer der identifizierten Haupteinflussfaktoren mit berücksichtigt werden.

## 2.3 Visuelle Wahrnehmung von Signalleuchten

Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, dienen die Beleuchtungseinrichtungen am Fahrzeug der Erhöhung der Verkehrssicherheit und gleichzeitig als Gestaltungselement. Für beide Aspekte

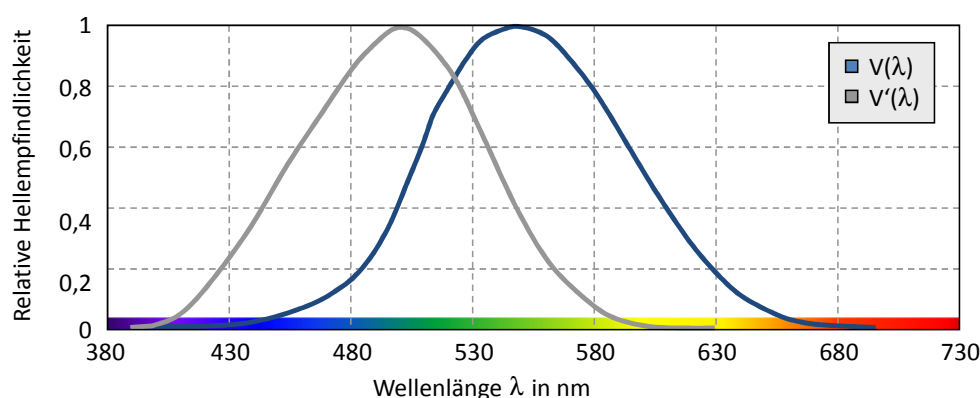
ist die Wahrnehmung der Leuchten durch den Menschen maßgeblich. Der Prozess der Wahrnehmung durch Sinnesorgane wird als Perzeption bezeichnet und ist abhängig von der Größe und der Beschaffenheit des auslösenden Reizes und des betroffenen Sinnesorgans. Im Bereich der Automobilbeleuchtung ist das Auge das entscheidende Sinnesorgan. Ein Reiz entspricht einer Hellempfindung. Dem Reiz nachgelagert ist die Wahrnehmung durch das Gehirn, also die Interpretation des aufgenommenen Reizes. Die Bewertung ist abhängig vom erlernten Wissen, dem kulturellen Hintergrund, dem ästhetischen Empfinden und der mentalen Verfassung des Empfängers zum Zeitpunkt der Reizempfindung. Inhalt und Qualität der Sinneswahrnehmung können bewusst durch gezielte Aufmerksamkeit, beispielsweise innerhalb der Leuchtenbewertungssituation, gesteigert werden.

Nachfolgend werden die zwei für die visuelle Wahrnehmung maßgeblichen Kriterien Hellempfindung und Sehleistung näher erläutert.

### 2.3.1 Hellempfindung

Die Helligkeit beschreibt den visuellen Eindruck, der durch die wahrgenommene Leuchtdichte von Objekten erzeugt wird. Eine Hellempfindung stellt somit die Reizantwort der Empfänger in der Netzhaut des Auges auf eine vorhandene Beleuchtungsstärke, die durch die Leuchtdichte des Sehelements bestimmt wird, dar. Der Zusammenhang zwischen Hellempfindung und Leuchtdichte ist nicht linear [BEGS96]. Die wahrgenommene Helligkeit wird durch verschiedene Aspekte wie die spektrale Hellempfindlichkeit, die Umgebungsleuchtdichte, den Sehwinkel und die Darbietungsdauer beeinflusst.

Die einzelnen Spektralbereiche des sichtbaren Lichts rufen im Menschen unterschiedliche Hellempfindungen hervor. Das heißt, dass unterschiedliche Farben als unterschiedlich hell empfunden werden, obwohl sie die gleiche Intensität aufweisen. Um diese Empfindungen beschreiben zu können, werden die Größen mit der spektralen Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$  des menschlichen Auges bewertet. Abbildung 2.6 zeigt die sogenannte  $V(\lambda)$ -Kurve, wie sie von der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) 1924 für einen 2°-Normalbeobachter standardisiert wurde [DIN5031]. Sie gilt für das helladaptierte Auge (photopischer Bereich). Die Abbildung zeigt außerdem die  $V'(\lambda)$ -Kurve für das dunkeladaptierte Auge (skotopischer Bereich). Adaptation ist die Anpassung des Auges an die Umgebungshelligkeit.

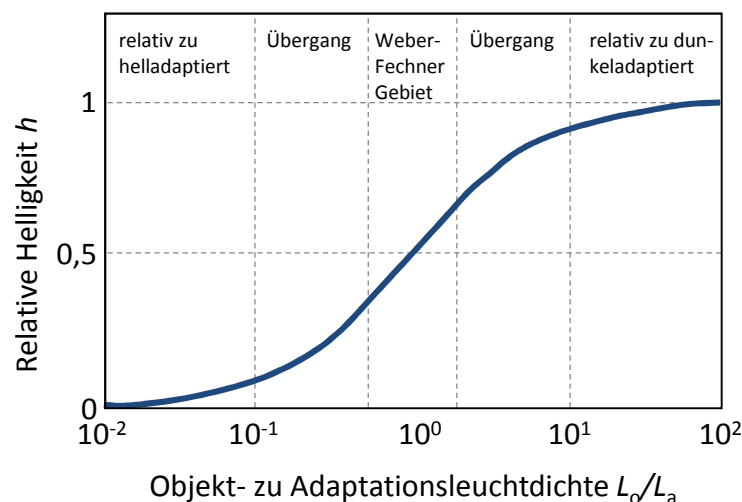


**Abbildung 2.6:** Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen für Tag- ( $V(\lambda)$ ) und Nachtsehen ( $V'(\lambda)$ )



Zwischen dem Tag- und dem Nachtsehen befindet sich der Helligkeitsbereich des Dämmerungssehens (mesopischer Bereich), bei ungefähr  $0,01 \text{ cd/m}^2$  bis  $30 \text{ cd/m}^2$  [BEGS96, Gal04, Völ06]. Die Übergänge zwischen den drei Helligkeitsbereichen sind fließend und individuell verschieden. Das visuelle System ändert in einer gewissen Zeit seine Empfindlichkeit in Abhängigkeit von den Leuchtdichten im Gesichtsfeld. Der Vorgang läuft in zwei Schritten ab. Im ersten Schritt verändert sich die Öffnung der Iris und regelt somit die relative Lichtmenge, die in das Auge fällt. Danach ändern die lichtempfindlichen Zellen auf der Netzhaut ihre Empfindlichkeit. Der letztere Vorgang ist ein sehr langsamer Prozess, so dass es einige Minuten dauern kann, bis das Auge sich an die neue Lichtsituation gewöhnt hat. Sind die Augen längere Zeit einer niedrigen Lichtintensität ausgesetzt, so erhöht sich ihre Empfindlichkeit und das nun wahrgenommene Licht erscheint heller. Diese sogenannte Dunkeladaptation geht in den ersten Minuten der Dunkelheit vor sich. Die Anpassung von Zapfen (Rezeptoren für das Tag- also Farbsehen) und Stäbchen (Rezeptoren für das Nachtsehen, die sehr licht-, aber nicht farbeempfindlich sind) läuft in unterschiedlichen Geschwindigkeiten ab. Während die Zapfenadaptation schon nach ungefähr sieben Minuten abgeschlossen ist, brauchen die Stäbchen aufgrund des großen Dynamikumfangs ungefähr 20 Minuten bis eine Stunde, bis sie vollständig angepasst sind [Nar03, LK76].

Für eine Quantifizierung der wahrgenommenen Helligkeit sei hier auf das Helligkeitsmodell von Adams und Cobb aus dem Jahre 1922 verwiesen [AC22]. Innerhalb des Modells wird davon ausgegangen, dass die wahrgenommene Helligkeit sich direkt proportional zur Frequenz der Nervenimpulse in den Ganglienzellen (innere Nervenzellschicht der Netzhaut des Auges) verhält. Abbildung 2.7 und Gleichung (2.1) zeigen zusammengefasst, das Ergebnis der Arbeit. Der linke Teil der Kurve entspricht dem Blick in ein dunkles Umfeld bei Tag, beispielsweise



**Abbildung 2.7:** Helligkeitsmodell von Adams und Cobb [AC22]

in einen Tunnel. Der relative Helligkeitszuwachs und auch die Kontrastempfindlichkeit nehmen mit steigender Objektleuchtdichte nur sehr langsam zu. Das visuelle System ist somit relativ zu helladaptiert. Im rechten Teil der Kurve verhält es sich genau umgekehrt. Als Beispiel kann hier das Verlassen eines langen, wenig beleuchteten Tunnels bei Tag angenommen werden. Unterschiedlich helle Objekte außerhalb des Tunnels weisen nur sehr geringe Helligkeitsänderungen auf. Der bevorzugte Sehbereich liegt genau dazwischen, im linearen Teil der Kurve. In diesem Bereich entsprechen die Objektleuchtdichten ungefähr der adaptationsbestimmenden Leucht-

dichte. Interessanterweise kann die 1. Ableitung der Funktion der relativen Helligkeit als Maß für die Kontrastempfindlichkeit dienen. Die relative Kontrastempfindlichkeit ist damit bei Objektleuchtdichten nahe der Adaptationsleuchtdichte am größten.

$$h = \frac{L_o}{L_o + L_a} \quad (2.1)$$

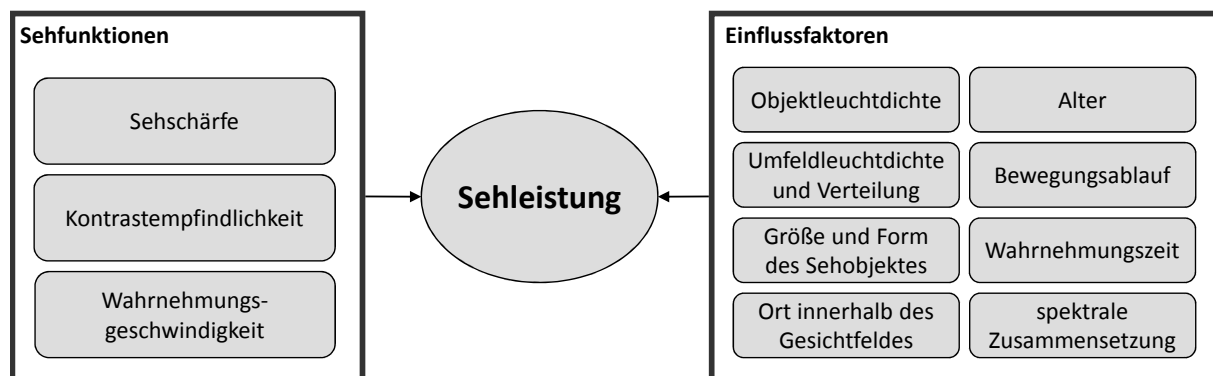
Dabei entspricht  $h$  der relativen Helligkeit,  $L_o$  der Leuchtdichte des Sehobjekts und  $L_a$  der Adaptationsleuchtdichte [Kok03]. Laut Kokoschka sind trotz des sehr einfachen Aufbaus die wichtigsten Aspekte des Helligkeitssehens enthalten. Der Helligkeitseindruck hängt maßgeblich vom Adaptationszustand des Auges ab. Im Falle einer homogenen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld lässt sich nach Gall [Gal83] die sogenannte äquivalente Adaptationsleuchtdichte berechnen. Er merkt an, dass sich die Adaptationsleuchtdichte bei starrer Beobachtung nicht so einfach bestimmen lässt. Narisada kommt zu dem Ergebnis, dass zur Schätzung der äquivalenten Adaptationsleuchtdichte die mittlere Leuchtdichte der wahrgenommenen Szene verwendet werden sollte [Nar03]. Aufgrund der geringen Abstände zwischen Betrachter und Signalleuchte und dem sich daraus ergebenden großen Sehinkel, der fovealen Betrachtung und den typischen mittleren Leuchtdichten einer im ECE-Raum zugelassenen Kfz-Schlussleuchte von ungefähr  $1000 \text{ cd/m}^2$ , wird bei der in dieser Arbeit durchgeführten Probandenstudie von einer Bewertungssituation unter photopischen Bedingungen ausgegangen. Durch die relativ fixierte Betrachtung wird innerhalb dieser Arbeit damit gerechnet, dass die mittlere Leuchtdichte der Versuchsobjekte maßgeblich die äquivalente Adaptationsleuchtdichte  $\bar{L} \approx L_a$  bestimmt. Dies ist für eine möglichst kritische Bewertung der Gleichmäßigkeit der Leuchten, laut dem in Abbildung 2.7 erläuterten Helligkeitsmodell, ideal.

### 2.3.2 Sehleistung

Die Sehleistung stellt eine wichtige Leistungsgröße dar, die sich aus elementaren Sehfunktionen, wie beispielsweise der Sehschärfe und der Kontrastempfindlichkeit, zusammensetzt. Abbildung 2.8 zeigt beteiligte Sehfunktionen und identifizierte Einflussfaktoren, also die zum Zeitpunkt der Beurteilung herrschenden Umgebungsbedingungen, wie die Umfeldleuchtdichte und deren Verteilung, die Leuchtdichte des Sehobjekts und die Objektgröße [BEGS96]. Es muss zwischen Schwellenwerten und Dauerwerten unterschieden werden. Schwellenwerte sind die Sehleistungen, welche am Auge gerade noch nachgewiesen werden können. Je geringer die Schwellenwerte sind, desto größer ist die Sehleistung. Die Dauerwerte müssen vorhanden sein, damit eine Sehleistung über längere Zeit ermüdungsfrei erbracht werden kann. Ermüdung äußert sich als Augenmuskel-, Gehirn- oder Allgemeinerermüdung beispielsweise in Form von Augenbrennen, Schleiersehen oder Doppelsichtigkeit und ist als Gesamtheit nicht messbar [Gre01].

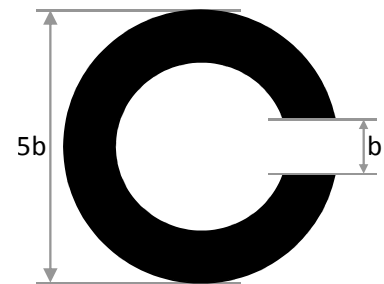
In diesem Abschnitt werden die Sehschärfe und die Kontrastempfindlichkeit erläutert. Wie den nachfolgenden Ausführungen zu entnehmen ist, unterliegen die zwei Sehfunktionen den gleichen Einflussfaktoren und sind somit eng miteinander verknüpft.





**Abbildung 2.8:** Aufschlüsselung der Bestandteile der Sehleistung, untergliedert nach Sehfunktionen und Einflussfaktoren, eigene Darstellung nach [BEGS96].

Die Sehschärfe beschreibt die Fähigkeit des Auges, zwei räumlich getrennte Objekte gerade noch als getrennt wahrnehmen zu können. Sie wird häufig mittels eines Normsehzeichens gemessen. Abbildung 2.9 zeigt das in der Norm vorgeschriebene Sehzeichen, den Landoltring [ISO8596]. Die angulare Sehschärfe  $s$  berechnet sich nach Gleichung (2.2) aus dem Betrachtungsabstand  $r$  und der Gegenstandsweite  $b$ , und ist damit definiert als der Kehrwert des Winkels (in Bogenminuten) der kleinsten noch erkennbaren Gegenstandsweite  $b$ .



**Abbildung 2.9:** Landoltring

Die Sehschärfe kann Werte bis zu  $s = 2,0$  annehmen. Bei einer Sehschärfe von  $s = 1,0$  liegt Normalsichtigkeit vor.

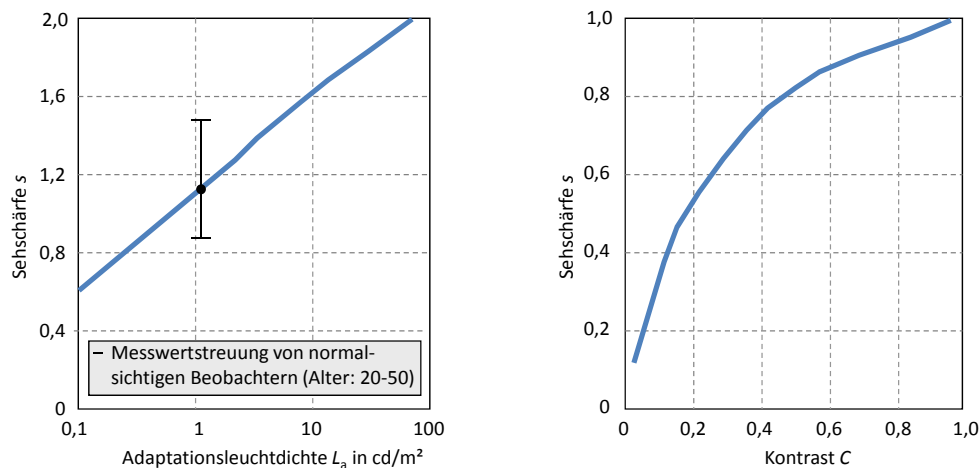
$$s = \frac{1}{60 \cdot \arctan \frac{b}{r}} \quad (2.2)$$

In Abbildung 2.10 wird die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Adaptationsleuchtdichte und dem Kontrast zwischen Sehzeichen und direktem Umfeld gezeigt. Die Abhängigkeit zur Adaptationsleuchtdichte ergibt sich aus dem Umstand, dass während eines Adaptationsvorganges von hell zu dunkel mehr und mehr Fotorezeptoren des Auges zu einem virtuellen Rezeptor zusammengeschaltet werden. Dadurch erhöht sich die Hellempfindlichkeit bei gleichzeitiger Abnahme der Sehschärfe.

Die zweite betrachtete Sehfunktion ist die Kontrastempfindlichkeit. Sie ist die Fähigkeit des Menschen, gerade noch erkennbare Leuchtdichteunterschiede wahrzunehmen. Der Kontrast ist für ein gleichmäßig erscheinendes Sehobjekt vor einem gleichmäßigen Hintergrund wie folgt definiert (Weber-Kontrast):

$$C = \frac{|L_o - L_u|}{L_u} \quad (2.3)$$

mit  $L_o$  als Objekt- und  $L_u$  als Umfeldleuchtdichte. Dies ergibt für helle Objekte vor dunklem Grund (Positivkontrast) Werte von 0 bis  $\infty$  und für dunkle Objekte vor hellem Grund (Negativkontrast) Werte zwischen 0 und 1 [WR11]. Es wird zwischen Schwellenkontrasten und überschwelligen Kontrasten unterschieden. Wenn ein Objekt mit 50% Wahrscheinlichkeit wahrgenommen werden soll, muss der Kontrast größer als der Schwellenkontrast  $C_s$ , der geringste

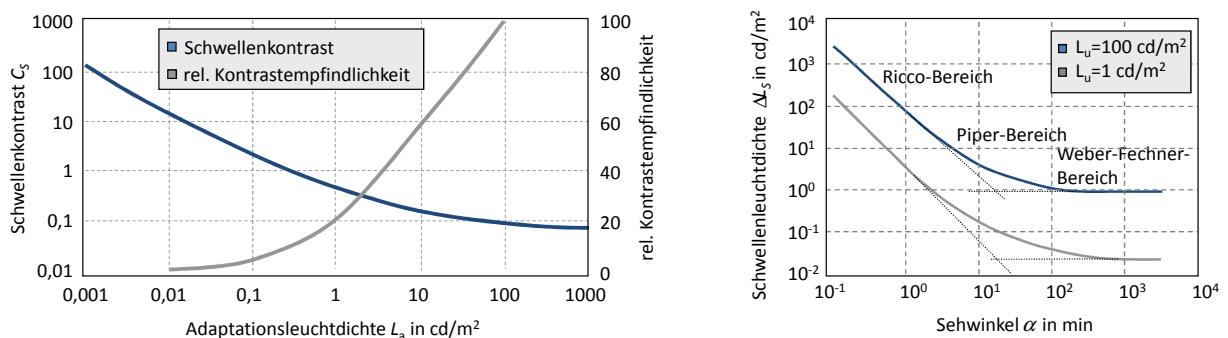


**Abbildung 2.10:** links: Abhängigkeit der Sehschärfe von der Adaptationsleuchtdichte; rechts: Kontrastabhängigkeit der Sehschärfe (für Leuchtdichten von 3...300 cd/m²) nach [BEGS96].

vom Menschen wahrzunehmende Leuchtdichtekontrast, sein [BEGS96]. Bei gegebener Umfeldleuchtdichte lässt sich mithilfe des Schwellenkontrasts eine minimale Leuchtdichtedifferenz berechnen, die sogenannte Schwellenleuchtdichtedifferenz  $\Delta L_S$ . Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (2.4) dargestellt:

$$C_S = \frac{\Delta L_S}{L_u} . \quad (2.4)$$

Der Schwellenkontrast und die relative Kontrastempfindlichkeit werden durch die Adaptationsleuchtdichte beeinflusst, was Abbildung 2.11 links zeigt. Die rechte Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichtedifferenz  $\Delta L_S$  vom Sehwinkel nach [SC99]. Die dargestellte Kurve ist in drei Bereiche unterteilt. Für diese Arbeit ist der Weber-Fechner-Bereich relevant. Er gilt für ausgedehnte leuchtende Flächen und besagt, dass die Schwellenleuchtdichtedifferenz nur durch die Signal- und die Umfeldleuchtdichte beschrieben wird, vom Sehwinkel jedoch unabhängig ist. Das heißt, ab einer bestimmten Größe der leuchtenden Fläche nähert sich der gerade noch wahrnehmbare Leuchtdichteunterschied einem Minimum an.



**Abbildung 2.11:** links: Kontrastempfindung und Schwellenkontrast in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte bei einer Sehobjektgröße von 4', Darbietungsdauer von 0,2 s und einem großen homogenen Umfeld; rechts: Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichtedifferenz vom Sehwinkel [SC99].

Untersuchungen haben gezeigt, dass der Schwellenkontrast neben der Adaptationsleuchtdichte auch von der Relativgeschwindigkeit, mit der ein Objekt gesehen wird, abhängt. Sich langsam bewegende Objekte haben einen geringeren Schwellenkontrast als statische Objekte. Ein sich



Bei einer euklidischen Transformation ändern sich weder Längen noch Winkel eines Objektes. Sie stellt somit eine lineare Transformation von einem orthogonalen Koordinatensystem in ein neues orthogonales Koordinatensystem dar. Der euklidische Raum ist ein Unterraum des affinen Raumes. Dieser stellt den Zusammenhang zwischen zwei unterschiedlich beschaffenen Koordinatensystemen her. Er weist weniger Invarianten auf, da eine affine Transformation die Form eines Objektes über eine Skalierung oder Scherung ändern kann. Es bleiben allerdings Verhältnisse und die Parallelität von Objekten weiterhin erhalten. Der affine Raum stellt einen Unterraum des projektiven Raumes dar.

Der projektive Raum ermöglicht die mathematische Beschreibung der perspektivischen Projektion, siehe Abbildung 2.12 rechts. In ihm bleiben Verhältnisse und Parallelitäten nach einer Transformation nicht erhalten. Die einzigen Invarianten sind somit die Inzidenz, also die Gemeinsamkeit von Punkten und das Doppel- oder Kreuzverhältnis. Letzteres ist in Abbildung 2.13 beschrieben und als das Verhältnis von Verhältnissen definiert:

$$DV(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = \frac{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_3}{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_4} \cdot \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_4}{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_3}. \quad (2.6)$$

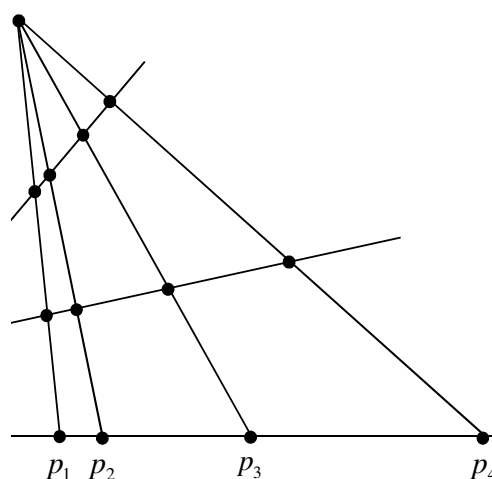
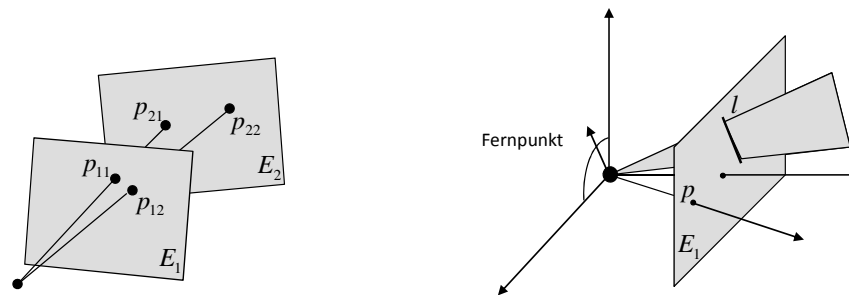


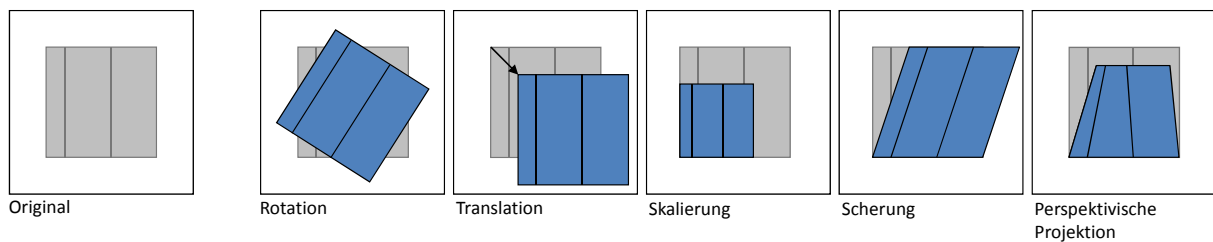
Abbildung 2.13: Doppelverhältnis

Mithilfe einer projektiven Transformation lassen sich Punkte auf einer Ebene im Raum auf eine beliebige andere Ebene überführen. Diese Transformation wird als Homographie bezeichnet und beschreibt den Zusammenhang zwischen gleichen Punkten auf unterschiedlichen Ebenen, siehe Abbildung 2.14 links. Ein wichtiger Bestandteil des projektiven Raumes sind die homogenen Koordinaten, die mit dem Symbol  $\sim$  gekennzeichnet werden und einen eleganten Formalismus der Computergrafik darstellen. Mit diesem ist es möglich, alle Transformationen der perspektivischen Projektion einheitlich zu beschreiben und somit den gesamten Abbildungsprozess in einer einzigen Matrix, der Projektionsmatrix, darzustellen [Jäh05]. Es werden alle Vektoren um eine Dimension erweitert. Die zusätzliche Komponente wird zu Eins gesetzt und stellt einen Skalierungsfaktor dar. Die Vektoren sind, bis auf diesen Skalierungsfaktor, definiert. Das heißt, es ist nur noch die Richtung, nicht aber die Länge, des Vektors relevant. Im Prinzip bedeutet das, dass der Punkt  $\mathbf{p}_{\text{euklidisch}} = [x, y]^T$  zur Geraden  $\mathbf{p}_{\text{projektiv}} = [x, y, 1]^T$  und Geraden zu Ebenen werden, siehe Abbildung 2.14 rechts. Durch Normierung auf die letzte Komponente ergibt sich der korrespondierende Vektor im affinen Unterraum. Wenn der Skalierungsfaktor Null ist, ergibt sich ein Punkt, der im affinen Unterraum nicht definiert ist. Dieser wird als idealer Punkt bezeichnet und befindet sich im Unendlichen. In diesem Punkt schneiden sich parallele Geraden. Spezialfälle, wie der Schnittpunkt zweier paralleler Geraden, lassen sich somit eindeutig beschreiben und müssen nicht gesondert behandelt werden. Im projektiven Raum liegen diese sogenannten Fernpunkte alle auf einer Geraden, der Ferngerade. Fernpunkte und Ferngerade entsprechen den Fluchtpunkten und dem Horizont in der Malerei. Abbildung 2.15 zeigt mögliche Transformationen im projektiven Raum und Tabelle 2.2 die Transformationen aller Raumkonzepte und zugehörige Invarianten.

In dem Softwaresystem, welches im Rahmen dieser Arbeit entsteht, werden Geometriedaten verarbeitet. Ziel ist es, diese über eine perspektivische Projektion so abzubilden, als würden



**Abbildung 2.14:** links: projektive Transformation [Sch05]; rechts: Punkt und Gerade in homogenen Koordinaten, als Gerade und Ebene, im projektiven Raum [Sch05]



**Abbildung 2.15:** Mögliche Objekttransformationen des projektiven Raumes: Rotation, Translation, Skalierung, Scherung, perspektivische Projektion, jeweils  
 ■ ... Objekt vor der Transformation und  
 ■ ... Ergebnis nach der Transformation.

sie mit einer Leuchtdichtekamera betrachtet. Dafür ist eine genaue Kenntnis über die geometrischen Parameter der nachzubildenden Kamera und Verständnis für die einzelnen Schritte des Abbildungsprozesses erforderlich.

**Tabelle 2.2:** Transformationen und Invarianten der verschiedenen Raumkonzepte.

	Euklidisch	Affin	Projektiv
<b>Transformationen</b>			
Rotation, Translation	✓	✓	✓
Skalierung, Scherung		✓	✓
perspektivische Projektion			✓
<b>Invarianten</b>			
Länge, Winkel	✓		
Verhältnisse, Parallelität	✓	✓	
Inzidenz, Doppelverhältnis	✓	✓	✓

Die Abbildung eines dreidimensionalen Punktes auf die zweidimensionale Bildebene unterteilt sich in mehrere Transformationen, die im nachfolgenden Abschnitt, unter Zuhilfenahme des Lochkameramodells, erläutert werden.

## 2.5 Lochkameramodell

In den nächsten Abschnitten werden die geometrischen Zusammenhänge eines beliebigen 3D-Weltpunktes  $M_W$  und seiner Projektion  $m$  in der Bildebene aufgezeigt, die sich in die drei Schritte

- externe,
- perspektivische und
- interne Transformation

unterteilen. Die Erläuterungen erfolgen anhand des Lochkameramodells. Eine Lochkamera ist die einfachste Art einer Kamera. Sie besteht aus einer Kammer, die an einer Seite eine kleine verschließbare Öffnung und an der gegenüberliegenden Seite ein lichtempfindliches Material aufweist. Eine optische Linse ist somit kein Bestandteil der Lochkamera. Der Abbildungsprozess funktioniert derart, dass sich alle Punkte im Raum über ein optisches Zentrum, dem Brennpunkt, auf die Bildebene abbilden lassen. Die Abbildung erfährt dabei eine Punktspiegelung am Brennpunkt [Sch05, Olp01]. Eine Abbildung nach dem Lochkameramodell, ist in Abbildung 2.16 dargestellt.

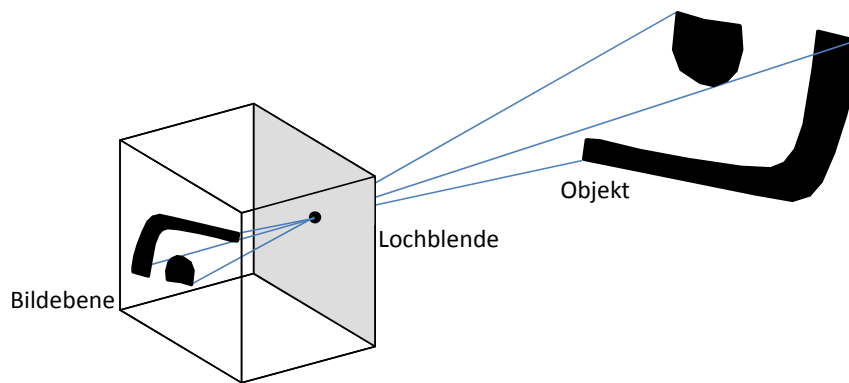


Abbildung 2.16: Lochkameramodell

Unter Umständen müssen bei einer Messung mit einer Kamera mit optischer Linse weitere Effekte, wie beispielsweise geometrische Verzerrungen, mit berücksichtigt werden. Diese treten vor allem bei kurzen Brennweiten auf und werden in Abschnitt 2.5.4 diskutiert.

### 2.5.1 Externe Transformation

Im ersten Schritt, der externen Transformation, wird der Zusammenhang zwischen der Kamera und dem frei wählbaren Weltkoordinatensystem hergestellt. Das Projektionszentrum der Kamera stellt den Ursprung  $C$  des Kamerakoordinatensystems dar. An einer realen Kamera entspricht es dem Mittelpunkt der Eintrittspupille des Objektivs. Die optische Achse der Kamera zeigt in  $Z$ -Richtung und schneidet die Bildebene im Kamerahauptpunkt  $c$ . Um nun eine eindeutige Relation zu erhalten, wird das Kamerakoordinatensystem über eine euklidische Transformation, bestehend aus einer Rotation und einer Translation, auf ein Weltkoordinatensystem bezogen. Die Abbildung eines Weltpunktes  $M_W$  in Kamerakoordinaten ergibt sich aus Gleichung (2.5) zu:

$$M_C = \mathbf{R}M_W + \mathbf{t}. \quad (2.7)$$

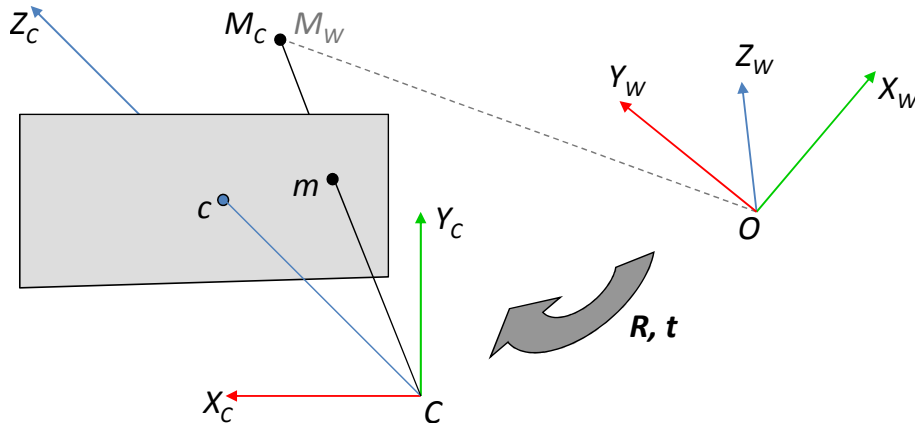
Die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  ist dabei wie folgt definiert:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ 0 & \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Wobei  $\vartheta, \varphi, \psi$  hier den Drehwinkeln um die drei Koordinatenachsen entsprechen. Die Rotation ist nicht kommutativ, die Reihenfolge der Berechnung muss eingehalten werden. In homogenen Koordinaten ausgedrückt, wird aus der Matrixmultiplikation der Rotation und der anschließenden Vektoraddition der Translation, welche die Verschiebung in Richtung der jeweiligen Koordinatenachse beschreibt, eine einzelne Matrixmultiplikation:

$$\tilde{M}_C = D \tilde{M}_W, \text{ mit } D = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \text{ und } 0_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

$D$  beinhaltet die extrinsischen Kameraparameter. Die externe Transformation hat sechs Freiheitsgrade, drei für die Rotation und drei für die Translation. Abbildung 2.17 veranschaulicht die externe Transformation.



**Abbildung 2.17:** Externe Transformation, bestehend aus einer Rotation  $R$  und einer Translation  $t$ , zur Überführung eines dreidimensionalen Punktes  $M_W$  im Weltkoordinatensystem mit dem Ursprung  $O$  in einen Punkt  $M_C$  im Kamerakoordinatensystem mit dem Ursprung  $C$ , nach [Sch05].

## 2.5.2 Perspektivische Transformation

Im zweiten Schritt erfolgt die perspektivische Transformation. Diese beruht auf der Gleichung für die Zentralprojektion:

$$\frac{x}{X_C} = \frac{y}{Y_C} = \frac{f}{Z_C}. \quad (2.10)$$

In Pixeleinheiten lautet der Zusammenhang für einen 3D-Punkt mit den Koordinaten  $X_C, Y_C, Z_C$  und dem gleichen Punkt in Sensorkoordinaten  $u, v$ , unter Berücksichtigung der Brennweite  $f$ , in dem Fall dem Abstand der Sensorebene zum Brennpunkt, somit:

$$u = f \frac{X_C}{Z_C}, \quad v = f \frac{Y_C}{Z_C}. \quad (2.11)$$

Dies lässt sich mittels homogener Koordinaten auch als Matrixmultiplikation darstellen:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ mit } u = \frac{U}{S}, v = \frac{V}{S} \text{ für } S \neq 0. \quad (2.12)$$

Die nachfolgende Gleichung erläutert diesen Zusammenhang im projektiven Raum:

$$s\tilde{\mathbf{m}}' = \mathbf{P}'\tilde{\mathbf{M}}_C, \text{ mit } \mathbf{P}' = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ und } s = S. \quad (2.13)$$

Dabei entspricht  $\mathbf{P}'$  der perspektivischen Projektionsmatrix. Der 3D-Punkt  $\tilde{\mathbf{M}}_C$  in homogenen Koordinaten transformiert sich mit der perspektivischen Projektion auf die Ebene in den Punkt  $\tilde{\mathbf{m}}'$ . Dieser Abbildungsprozess ergibt sich somit aus den Gleichungen (2.9) und (2.13) zu:

$$s\tilde{\mathbf{m}}' = \mathbf{P}'\mathbf{D}\tilde{\mathbf{M}}_W \quad (2.14)$$

und entspricht einer projektiven Transformation vom dreidimensionalen projektiven Raum in die zweidimensionale projektive Ebene.

### 2.5.3 Interne Transformation

Noch immer ist die Maßeinheit des Koordinatensystems metrisch. Im letzten Schritt, der internen Transformation, findet der Übergang von Sensor- zu Bildkoordinaten statt. Über die horizontale und vertikale Skalierung  $k_u, k_v$  erfolgt eine Skalierung der Pixel, sollten diese nicht quadratisch sein und über den Skalierungsfaktor  $s$  eine Umrechnung von Millimeter in diskrete Pixel. Anschließend erfolgt eine Verschiebung  $u_0, v_0$  des Bildkoordinatenmittelpunktes des Sensors in den Kamerahauptpunkt  $c$ . Über  $s_{\text{skew}}$  kann eine gegebenenfalls existierende schief-symmetrische Ausrichtung der Achsen des Bildsensors beschrieben werden. Dieser Faktor ist üblicherweise aber vernachlässigbar klein. Alle Parameter zu einer linearen Transformation zusammengefasst, ergibt:

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{m}}', \text{ mit } \mathbf{H} = \begin{pmatrix} k_u & s_{\text{skew}} & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

In Kombination mit der perspektivischen Transformation  $\mathbf{P}'$  ergibt sich:

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\mathbf{P}'\tilde{\mathbf{M}}_C, \text{ mit } \mathbf{A} = \mathbf{H}\mathbf{P}' = \begin{pmatrix} fk_u & s_{\text{skew}} & u_0 & 0 \\ 0 & fk_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

Die Matrix  $\mathbf{A}$  beschreibt somit die intrinsischen Parameter der Kamera. Die vollständige Transformation eines 3D-Punktes in Weltkoordinaten in seine Abbildung in der Bildebene ergibt sich somit zu:

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{M}}_C = \mathbf{A}\mathbf{D}\tilde{\mathbf{M}}_W = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{M}}_W, \text{ mit } \mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{D}, \quad (2.17)$$

mit  $\mathbf{P}$  als der verallgemeinerten perspektivischen Projektionsmatrix. Der Skalierungsfaktor  $s$  ergibt sich hierbei aus dem Kehrwert der Abmessungen eines einzelnen Pixels in  $\text{mm}^2$ . Sollten die Parameter der Kamera nicht bekannt sein, können sie in einem Kalibrierungsschritt ermittelt werden. Hierbei werden mithilfe eines, in der Szene befindlichen, bekannten 3D-Musters oder eines eindeutig rotierbaren 2D-Musters und den entsprechenden korrespondierenden Aufnahmen der Kamera, die Parameter der Kamera geschätzt [LT89, Hor00, Wei10]. Es erfolgt eine Schätzung der Elemente der perspektivischen Projektionsmatrix.

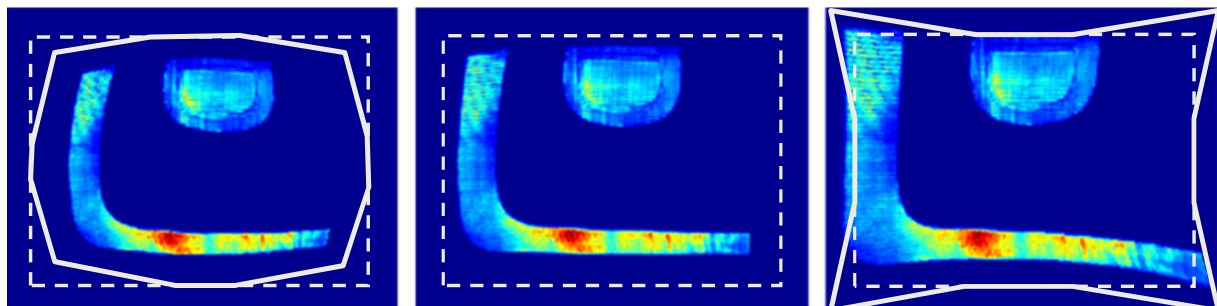


### 2.5.4 Einfluss von Linsenverzerrungen

Vor allem bei kleineren Brennweiten sind nichtlineare Verzerrungen durch die Krümmung der Linse zu berücksichtigen. Durch Einführung einer nichtlinearen Transformation der unverzerrten Koordinaten  $u, v$  in die verzerrten  $u_d, v_d$  besteht die Möglichkeit, diese Verzerrungen allgemein zu beschreiben. Es treten sowohl radiale  $\kappa$  als auch tangentiale  $\eta$  Verzerrungen auf, die mit steigendem radialen Abstand zum optischen Zentrum der Kamera zunehmen. Wenn nur radiale Anteile berücksichtigt werden [Tsa87], ergibt sich folgender Zusammenhang der verzerrten und der unverzerrten Koordinaten:

$$u = u_d \cdot (1 + \kappa \cdot r_d^2), \quad v = v_d \cdot (1 + \kappa \cdot r_d^2), \quad \text{mit } r_d = \sqrt{u_d^2 + v_d^2}. \quad (2.18)$$

Der radiale Verzerrungskoeffizient kann experimentell beispielsweise mithilfe einer Aufnahme einer Schachbrettmusterdarstellung ermittelt werden und liegt, bei den innerhalb dieser Arbeit verwendeten Objektiv-Kamera-Kombinationen ( $f_{01} = 25 \text{ mm}$ ,  $f_{02} = 50 \text{ mm}$ ), in der Größenordnung von  $\kappa < 10^{-6}$ . Abbildung 2.18 zeigt beispielhaft übliche tonnen- oder kissenförmige Verzerrungen. Das im Messsystem hauptsächlich verwendete 50 mm-Objektiv weist so geringe Verzerrungen auf, dass auf eine Entzerrung gänzlich verzichtet werden kann.



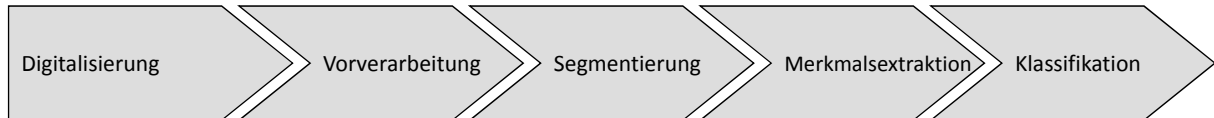
**Abbildung 2.18:** links: tonnenförmige Verzerrung; Mitte: originale Leuchtdichteverteilung ohne berechnete Verzerrung; rechts: kissenförmige Verzerrung

## 2.6 Digitale Filter und Bildoperationen

Die Bewertung der Signalleuchten erfolgt auf Basis von zweidimensionalen Leuchtdichteverteilungen. Diese können als Grauwertbilder interpretiert und mit den für Grauwertbilder existierenden Operationen verrechnet und statistisch ausgewertet werden. Ein Leuchtdichtebild stellt eine flächenhafte Verteilung der orts- und richtungsabhängigen lichttechnischen Größe Leuchtdichte  $L(x, y, z, \vartheta, \varphi)$  in einer Ebene dar. Da sich die Leuchtdichte entlang eines Strahls jedoch nicht ändert, sind  $x, y, z$  abhängig voneinander. Die Leuchtdichte kann mathematisch als eine, um eine Dimension reduzierte, kontinuierliche Funktion von vier räumlichen Variablen interpretiert werden. Die Leuchtdichtemesskamera besteht aus einem Matrix-Sensor (CCD) und einem  $V(\lambda)$ -Vollfilter zur orts aufgelösten Messung der Leuchtdichte. Dieses Messverfahren erzeugt somit keine kontinuierlichen, sondern diskrete zweidimensionale Zahlenfelder  $L(u, v)$ , mit  $u$  als horizontaler und  $v$  als vertikaler Position im Zahlenfeld. Innerhalb der Software ist die Richtung, aus welcher die Messkamera auf das Objekt schaut, von besonderem Interesse. Deswegen wird die Richtung in Kugelkoordinaten  $\vartheta, \varphi$  einer jeden Leuchtdichteverteilung als

Index mitgegeben. Es wird  $L_{\vartheta\varphi}(u, v)$  als zweidimensionales Zahlenfeld  $L$ , mit den Ortsvariablen  $u, v$  und den Betrachtungsrichtungsvariablen  $\vartheta, \varphi$  definiert.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Auswertung dieser Leuchtdichteverteilungen, beispielsweise zur Bewertung der Gleichmäßigkeit der Leuchtdichten innerhalb der sichtbaren leuchtenden Fläche oder dem Auffinden von Störstellen innerhalb dieser, entspricht dem klassischen Paradigma der Bildverarbeitung, siehe Abbildung 2.19. Da die Leuchtdichteverteilungen jedoch bereits in digitaler Form vorliegen, entfällt der erste Punkt.



**Abbildung 2.19:** Klassisches Paradigma der Bildverarbeitung nach [Fra04]

Die meisten der nachfolgend erläuterten Operationen gehören zur Klasse der Nachbarschaftsoperationen. Ein diskreter Nachbarschaftsoperator verknüpft über eine geeignete Operation die Werte in einer direkten Nachbarschaft um einen Punkt und schreibt das Ergebnis zurück an diesen Punkt. Die Operation erfolgt für alle Punkte des Zahlenfeldes. Die Nachbarschaftsoperatoren werden mit kalligraphischen Buchstaben  $\mathcal{B}$ ,  $\mathcal{G}$ ,  $\mathcal{M}$  gekennzeichnet. Von besonderer Relevanz ist die Größe der Nachbarschaft. Dieses lokale Gebiet wird als Maske bezeichnet. Da innerhalb der Arbeit der geometrische Ort der Informationen innerhalb der Leuchtdichteverteilung von Interesse ist, kommt eine symmetrische Maske, mit dem Bezugspunkt im Zentrum zum Einsatz. Die nachfolgenden Operationen werden alle anhand einer  $3 \times 3$ -Maske erläutert.

### 2.6.1 Glättungsfilter

Vor der Analyse der Leuchtdichteverteilungen ist es ratsam, eine Glättung der Daten vorzunehmen. Dies ist erforderlich, da es innerhalb einer Verteilung zu Bildrauschen kommen kann, was für CCD-Sensoren üblich ist [Jäh05]. Dabei wird in Dunkelrauschen, welches durch die unterschiedlichen Dunkelströme der einzelnen Pixel erzeugt wird, und das Ausleserauschen des Ausleseverstärkers unterschieden. Um diese Störeffekte in den Verteilungen auszugleichen, wird vor der eigentlichen Auswertung auf die komplette Verteilung ein einfacher Nachbarschaftsoperator angewandt, der den Mittelwert der beinhalteten Leuchtdichtewerte berechnet und als neuen Wert in der Leuchtdichteverteilung sichert. Es ist darauf zu achten, dass die Summe der Koeffizienten der Maske den Wert 1 annimmt, damit der Mittelwert in der Verteilung erhalten bleibt.

Für die Glättung der Leuchtdichtedaten kommt ein zweidimensionaler Binomialfilter  $\mathcal{B}$  zum Einsatz, dessen Maske sich folgendermaßen zusammensetzt:

$$\mathcal{B} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Diese Filter eignen sich sehr gut, um Rauschen innerhalb der Verteilung, welches durch die Auslese- und Verstärkungselektronik der Messkamera entsteht, zu unterdrücken. Es muss berücksichtigt werden, dass eine Mittelung immer auch eine Verringerung der Detailauflösung mit sich bringt.

## 2.6.2 Kantendetektion

Die Kontrastempfindlichkeit ist die Fähigkeit des menschlichen Auges gerade noch erkennbare Leuchtdichteunterschiede wahrzunehmen, siehe Abschnitt 2.3.1. Mathematisch ist sie gleichzusetzen mit der Bewertung von Gradienten innerhalb der Leuchtdichteverteilung durch das menschliche Auge, vgl. [Kle03]. In den Bewertungsalgorithmen werden die Gradienten im Bild über den nachfolgend vorgestellten Kantendetektionsfilter, den Sobeloperator, bestimmt. Wie bereits beim Glättungsfilter handelt es sich wieder um einen Nachbarschaftsoperator mit symmetrischer Maske. Dieser hat die Funktion, über die Faltung der Leuchtdichteverteilung mit den  $3 \times 3$ -Masken die erste Ableitung der Bildpunkt-Leuchtdichtewerte zu erzeugen und somit ein Gradientenbild zu erstellen. Den Sobeloperator gibt es für horizontale und vertikale Kanten, siehe Gleichungen (2.20) und (2.21). Er kommt in der optimierten Variante zum Einsatz, die sich durch einen minimalen Winkelfehler auszeichnet [Jäh05].

$$\mathcal{G}_u = \frac{1}{32} \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix} * L(u, v) \quad (2.20) \quad \mathcal{G}_v = \frac{1}{32} \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} * L(u, v) \quad (2.21)$$

Die Kantendetektion ist isotrop, das heißt, invariant für eine Drehung des Koordinatensystems. Die Berechnung des richtungsunabhängigen Gradientenbetrags kann über nachfolgende Gleichung erreicht werden:

$$|\mathcal{G}| = \sqrt{\mathcal{G}_u^2 + \mathcal{G}_v^2}. \quad (2.22)$$

Es erfolgt eine punktweise Quadrierung der beiden Filteroperatoren, danach eine Addition und abschließend die Berechnung der Quadratwurzel des Summenbildes. Abbildung 2.20 zeigt sowohl das Zwischen- als auch das Endergebnis der Kantendetektion.

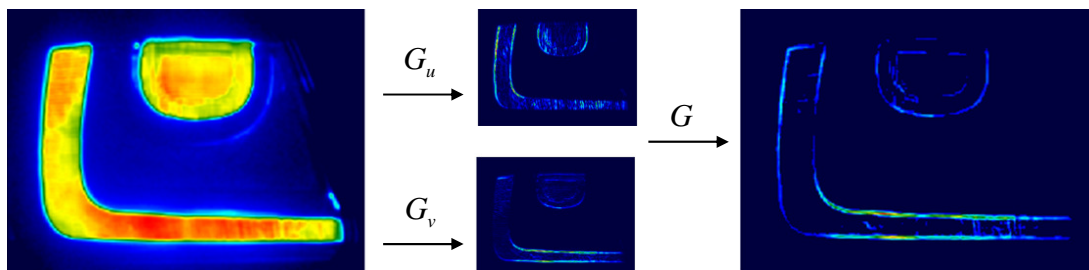


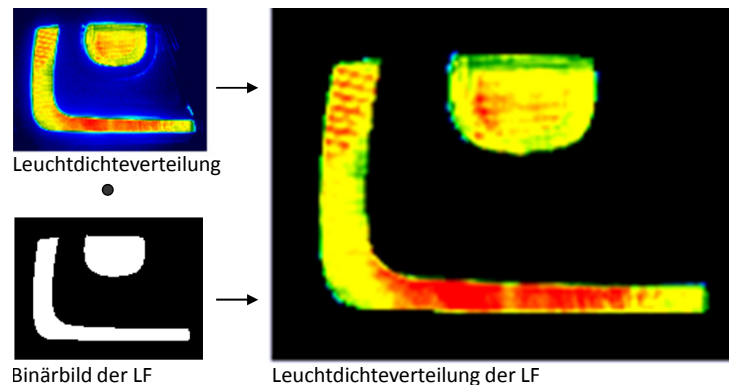
Abbildung 2.20: Kantendetektion am Beispiel einer Leuchtdichteverteilung

Dem Bild ist zu entnehmen, dass die höchsten Gradienten genau an den Kanten der Lichtaustrittsflächen auftreten. Dies stellt einen großen Nachteil bei der Bewertung der Gleichmäßigkeit über die Gradientenmethode dar, da es sich bei diesen eben nicht um Gradienten innerhalb der Lichtaustrittsfläche handelt. In den nachfolgenden zwei Abschnitten wird gezeigt, wie die Umrandung der Lichtaustrittsfläche aus der Gradientenbewertung herausgenommen werden kann.

## 2.6.3 Segmentierung

Die in den letzten zwei Abschnitten vorgestellten Filter dienen der Vorverarbeitung der Leuchtdichteverteilungen und besitzen im Wesentlichen die Funktion, Objekte in den Leuchtdichte-

verteilungen besser zu erkennen. Im Anschluss an die Vorverarbeitung folgt laut Abbildung 2.19 die Segmentierung des Bildes. Dabei wird der Vordergrund, also die Objekte, vom Hintergrund getrennt. Während der Segmentierung wird für jeden Bildpunkt entschieden, ob er zum Objekt gehört oder nicht. Dabei entsteht ein Binärbild. Diese haben die Eigenschaft, dass sie nur noch aus den Werten 0 für Schwarz (Hintergrund) und 1 für Weiß (Objekt) bestehen. Es erfolgt somit eine Separierung der relevanten von den irrelevanten Teilen des Bildes. In diesem Fall also beispielsweise eine Trennung von Leuchtdichtewerten innerhalb und außerhalb der Lichtaustrittsfläche(n).



**Abbildung 2.21:** Trennung der Informationen der Leuchtdichteverteilung in Vordergrund und Hintergrund.

Die Segmentierung kann

- pixel-,
- regionen-,
- diskontinuitäts- oder
- modellbasiert

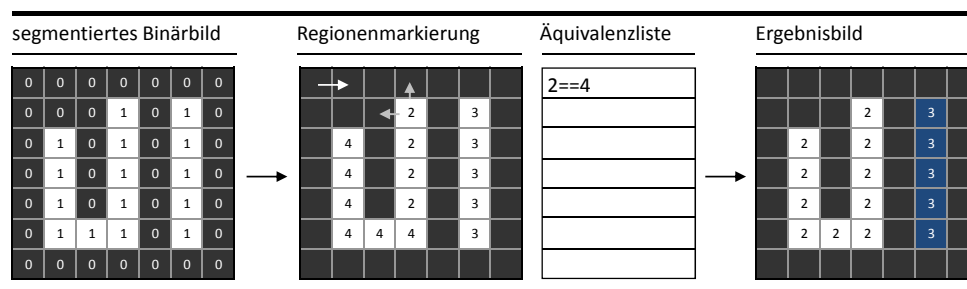
erfolgen. Innerhalb der Arbeit werden der pixelbasierte und der modellbasierte Ansatz eingesetzt. Die pixelbasierte Methode kann genutzt werden, da die Leuchtdichteunterschiede zwischen Lichtaustrittsfläche und Umgebung für gewöhnlich sehr groß sind. Über einen Leuchtdichteschwellwert können dann Hintergrund und Objekt von einander getrennt werden. Dieser Ansatz funktioniert dann sehr gut, wenn Hintergrund und Objekt an sich recht gleichmäßig sind, eine generelle Anwendung ist zu vermeiden. Der modellbasierte Ansatz nutzt die korrekte perspektivische Projektion der Geometriedaten der Lichtaustrittsflächen zur Erzeugung eines Binärbildes, welches den Wert 1 an den Punkten der Lichtaustrittsfläche(n) hat und sonst 0 ist. Dieses Binärbild wird zukünftig Maskierung  $M$  genannt. In Kapitel 5.3.4 ab Seite 101 werden weitere Anwendungen aufgezeigt.

Sobald die Maskierung vorliegt, kann eine Auswertung hinsichtlich der Anzahl der im Bild befindlichen Lichtaustrittsflächen, beispielsweise mittels der sequentiellen Regionenmarkierung nach [BB06], erfolgen. Abbildung 2.22 zeigt die prinzipielle Funktionsweise des Verfahrens. Das Originalbild wird zeilenweise Punkt für Punkt durchlaufen. Wenn im Originalbild ein schwarzes Pixel auftritt, wird im Ergebnisbild eine 0 gesetzt. Sollte im Originalbild ein weißes Pixel auftreten, wird im Ergebnisbild das Pixel darüber und das Pixel links davon ausgelesen. Ist eines der beiden Pixel nicht 0, wird dieser Wert auch für das aktuelle Pixel gesetzt. Wenn sowohl im linken als auch im darüber liegenden Pixel ein Wert  $> 0$  steht und diese sich unterscheiden, wird der linke Wert für das Ergebnisbild genutzt und in der Äquivalenzliste werden

beide Werte gespeichert, da sie zum selben Objekt gehören. Sind dagegen beide Pixel schwarz, wird die Objektzählvariable (beginnend bei 1) inkrementiert und der neue Wert im aktuellen Pixel des Ergebnisbildes gespeichert. Dadurch ergibt sich folgende Maskierung:

$$M(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{Hintergrund} \\ 1 & \text{Vordergrund} \\ 2, 3, \dots & \text{markierte Regionen} \end{cases}.$$

Nach dem ersten Durchlauf, wird das Ergebnisbild entsprechend der Äquivalenzliste so korrigiert, dass zusammengehörende Objekte durch eine einzige Zahl  $> 1$  repräsentiert werden. Aus dem Ergebnisbild kann nun die Anzahl, Größe, Form und die Lage der Lichtaustrittsflächen bestimmt werden.



**Abbildung 2.22:** *Sequentielle Regionenmarkierung, von links nach rechts: segmentiertes Binärbild, Ergebnisbild nach erstem Durchlauf, Äquivalenzliste mit den Indizes der verbundenen Regionen und das Ergebnisbild nach dem zweiten Durchlauf.*

Die Methode kann ebenfalls genutzt werden, um gefundene Gradienten zu separieren und hinsichtlich der Ausdehnung, Orientierung, Lage und Stärke zu bewerten. Es sei darauf hingewiesen, dass obige Beschreibung nur der Erläuterung der Methodik dient. Denn bei der Verwendung von Geometriedaten für die modellbasierte Segmentierung kann eine Separierung der einzelnen Lichtaustrittsflächen bereits vor der Verarbeitung erfolgen. Dadurch ist gewährleistet, dass auch bei einer seitlichen Betrachtung der Leuchte und einer eventuellen Überdeckung von mehreren Lichtaustrittsflächen eine korrekte Zuordnung der einzelnen Pixel zu ihrer jeweiligen Lichtaustrittsfläche erfolgt.

## 2.6.4 Morphologische Operatoren

In der Bildverarbeitung beschreibt die Morphologie das computergestützte Manipulieren von Bildern. In dieser Arbeit kommen zwei elementare morphologische Operatoren zum Einsatz: die Erosion und die Dilatation. Diese können im weitesten Sinne, wieder als Nachbarschaftsoperatoren auf Basis von Masken betrachtet werden. Dabei erfolgt eine binäre Faltung [Jäh05], also einer Und- (Erosion) oder Oder- (Dilatation) Operation der Maske  $M$  mit einem Binärbild, im konkreten Fall mit der Maskierung  $M$ . Die Erosion dient der Entfernung von kleinen Störungen und dem Ausdünnen von Objekten und ist über die nachfolgende Gleichung definiert:

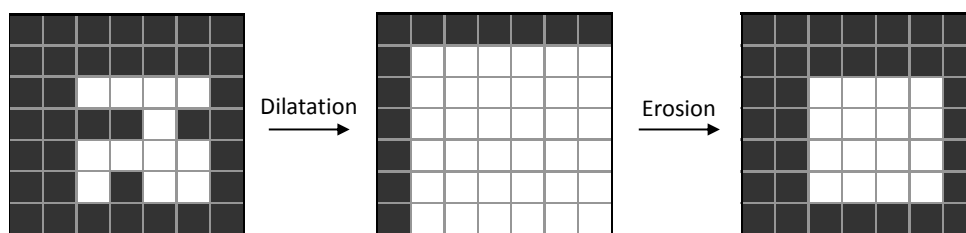
$$M'(u, v) = \bigwedge_{u'=-1}^1 \bigwedge_{v'=-1}^1 M(u', v') \wedge M(u + u', v + v'). \quad (2.23)$$

Über die zwei Und-Operatoren ergibt sich, dass im Ergebnisbild nur dann eine 1 eingetragen wird, wenn alle Pixel innerhalb der Maske ebenfalls 1 sind. Die Dilatation hat den gegenteiligen Effekt. Hier wird im Ergebnisbild eine 1 eingetragen, sobald ein beliebiges Pixel der Maske zu 1 gesetzt wird. Dadurch wird das Objekt ausgedehnt, kleine Löcher werden gefüllt und die Objektkonturen werden geglättet. Die Dilatation wird über folgende binäre Faltung erzeugt:

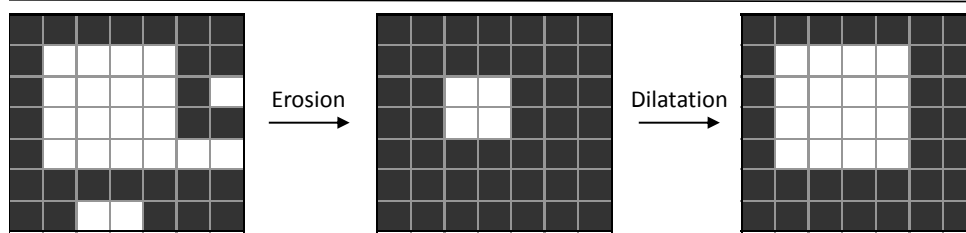
$$M'(u, v) = \bigvee_{u'=-1}^1 \bigvee_{v'=-1}^1 M(u', v') \wedge M(u + u', v + v'). \quad (2.24)$$

Die zwei Operatoren können vielfältig eingesetzt werden. Zum einen lässt sich die Maskierung einer Lichtaustrittsfläche mithilfe der Erosion gezielt verkleinern, um damit beispielsweise die hohen Gradienten, die am Rand einer Lichtaustrittsfläche innerhalb der Leuchtdichtevertelung auftreten, aus der Bewertung auszuschließen. Zum anderen kann diese verkleinerte Maskierung von einer zusätzlich mittels Dilatation leicht vergrößerten Originalmaskierung subtrahiert werden, um somit ein Binärbild zu erhalten, welches nur noch den Rand einer Lichtaustrittsfläche enthält. Abbildung 2.23 zeigt anhand von zwei binären Objekten die erläuterten morphologischen Operatoren. Richtige Anwendungen werden in Abschnitt 5.3.4 gezeigt.

Beispiel 1:



Beispiel 2:



**Abbildung 2.23:** Beispiele für die morphologischen Operatoren Erosion und Dilatation

## 2.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die nötigen Grundlagen für eine Bewertung von Kfz-Signalleuchten auf Basis von Leuchtdichtevertelungen beschrieben. Neben dem Aufzeigen der grundsätzlichen Notwendigkeit für die Existenz lichttechnischer Einrichtungen am Fahrzeug und den zugehörigen gesetzlichen Anforderungen, sind wichtige Erkenntnisse zur Hellempfindung und der Sehleistung des Menschen zusammengetragen. Es wird dargestellt, dass die Bewertung der Gleichmäßigkeit bisher keinen Einzug in die Gesetzgebung gefunden hat. Dies kann unter Umständen daran liegen, dass bisher keine Anforderungen an die für Signalleuchten maßgebliche

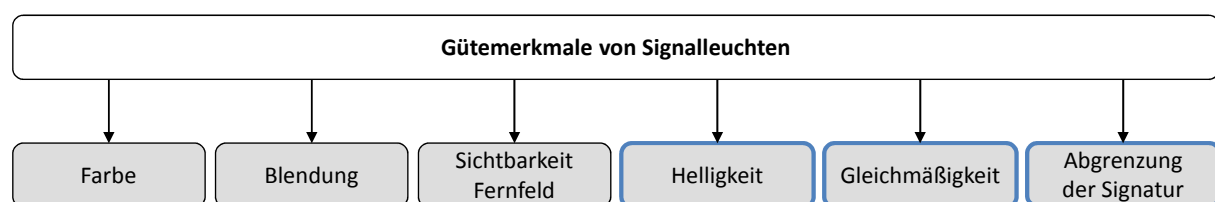
lichttechnische Größe, die Leuchtdichte, in den fahrzeugtechnischen Normen gestellt werden. In dieser Arbeit werden statistische Methoden zur Auswertung von Leuchtdichteverteilungen und daraus ableitbare Aussagen untersucht.

Aufgrund der konstruktiven Beschaffenheit und den in den aktuellen Designansprüchen begründeten eher kleinen Bauräumen, welche für Signalleuchten zur Verfügung stehen, ergibt sich eine stark ausgeprägte Richtungscharakteristik der Lichtstärke- und somit auch der Leuchtdichteverteilung. Dies erfordert, dass mehrere Betrachtungsrichtungen bei der Bewertung einer Signalleuchte berücksichtigt werden müssen. Speziell für die Gleichmäßigkeitsbewertung sollten möglichst viele Betrachtungsrichtungen ausgewertet werden, am Besten über das gesetzliche Maß hinausgehend, um den aktuellen Qualitätsansprüchen der Fahrzeughersteller gerecht zu werden.

Innerhalb des Kapitels werden außerdem die für die Verarbeitung von Leuchtdichteverteilungen entscheidenden Bildoperatoren, die grundlegenden Berechnungen zur perspektivischen Projektion von 3D-Geometriedaten und eine daraus abgeleitete Methode zur Segmentierung von Bilddaten mittels zweidimensionaler Maskierungen aufgezeigt. Dies ist nötig, da die Leuchtdichteverteilungen vor einer sinnvollen statistischen Auswertung in die relevanten Bestandteile (leuchtende und nicht-leuchtende Flächen) zerlegt werden müssen. Für die Bewertung der Gleichmäßigkeit ist es von fundamentalem Interesse aus allen Betrachtungsrichtungen den korrekten geometrischen Ort der leuchtenden Fläche zu kennen, um eine Aussage treffen zu können, ob diese leuchtende Fläche photometrisch überhaupt sichtbar ist.

### 3 Das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit

Die in Abschnitt 2.2 ab Seite 22 erläuterten gesetzlichen Regelungen, welchen Signalleuchten unterliegen, definieren Anforderungen an die Anbauposition und die minimalen und maximalen Lichtstärken in festgelegte Winkel im Raum. Über die genannten Anforderungen ist eine Signalleuchte für die Nutzung im Straßenverkehrsraum ausreichend beschrieben und gewährleistet das geforderte Minimum an Sicherheit. In der Leuchtenentwicklung sind über die gesetzlichen Regelungen hinausgehende Anforderungen erforderlich. Durch die zusätzlichen Kriterien sollen die Güte und die Wertigkeit einer Leuchte beschreibbar und damit quantifizierbar werden. Dies kann z. B. über angepasste Lichtstärkeanforderungen, Festlegung der Rot- und Orangetöne der Lichtfunktionen und größere photometrische Sichtbarkeitswinkel erfolgen. Abbildung 3.1 zeigt einige aus der Literatur abgeleitete Gütemerkmale für eine Bewertung von Kraftfahrzeugsignalleuchten, vgl. [Arm01, Rip01a, Kal09, Koe08, KM10]. Von besonderer Relevanz ist dabei das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit, da dessen lichttechnische Umsetzung bei den aktuellen Designansprüchen von großer Bedeutung ist.



**Abbildung 3.1:** Zusammengetragene Gütemerkmale zur Bewertung von Kraftfahrzeugsignalleuchten, von denen diejenigen farblich (□) hervorgehoben sind, die innerhalb der Arbeit näher betrachtet werden.

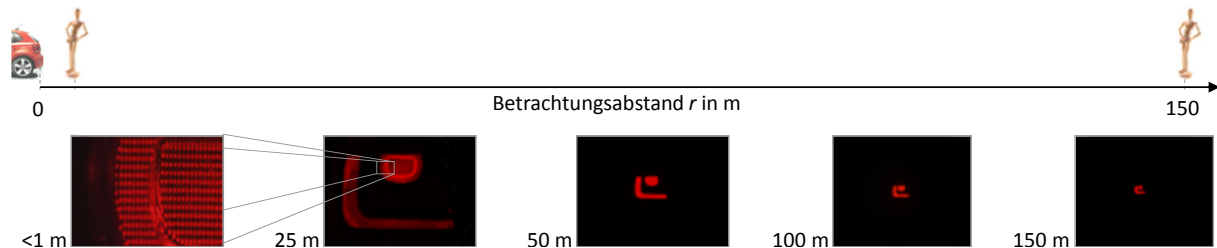
Im nachfolgenden Kapitel wird das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit definiert und nach den maßgeblichen Ausprägungen unterteilt. Es wird aufgezeigt, wodurch die Gleichmäßigkeit beeinflusst werden kann und es werden besonders sensible Einflussgrößen näher betrachtet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Modelle zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit für die unterschiedlichen Ausprägungen innerhalb der softwarebasierten Bewertung abgeleitet.

#### 3.1 Begriffsdefinition im automobilen Umfeld

Im Allgemeinen bezeichnet die Gleichmäßigkeit oder auch Homogenität die Gleichheit einer Eigenschaft über die gesamte Ausdehnung eines Systems. Das Wort setzt sich aus den griechischen Worten *homo* von *homoios* und *-gen* von *gignomai* zusammen, was mit „von gleicher Beschaffenheit“ übersetzt werden kann. Die Homogenität stellt somit zunächst kein Merkmal, sondern nur die Beschaffenheit oder Eigenschaft eines Merkmals dar. Bezogen auf die Bewertung von Scheinwerfern oder Leuchten darf damit streng genommen nicht nur von der Gleichmäßigkeit, sondern beispielsweise von der Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung, gesprochen



werden. In der Literatur zur Beurteilung von Scheinwerfern und Leuchten wird die Gleichmäßigkeit jedoch üblicherweise als eigenes Güte Merkmal aufgeführt, vgl. [Dah01, Kle03, Huh96, LK76, VKW03]). Im Bereich der Leuchtenentwicklung hat sich dies ebenfalls durchgesetzt, weshalb auch innerhalb der Arbeit so verfahren wird. Für alle folgenden Betrachtungen werden die Begriffe Gleichmäßigkeit und Homogenität gleichbedeutend verwendet und verstanden.



**Abbildung 3.2:** Anpassung des Beobachtungskontextes bei der Bewertung der Gleichmäßigkeit in Abhängigkeit vom Betrachtungsabstand.

Ein Phänomen, welches bei der Bewertung der Gleichmäßigkeit einer Leuchte auftritt, ist die stetige Anpassung des Beobachtungskontextes bei einer Abstandsvariation, siehe Abbildung 3.2. Die Bewertung erfolgt somit immer in Bezug auf die direkte Umgebung. Tabelle 3.1 zeigt die unterschiedlichen Ausprägungen des Güte Merkmals Gleichmäßigkeit in Abhängigkeit von diesem Betrachtungsabstand. Wenn die Bewertung sehr nah an einer Leuchte ( $r \leq 1$  m) erfolgt, werden auffällige Details innerhalb der leuchtenden Fläche betrachtet, beispielsweise ein sehr dunkles oder sehr helles Reflektorsegment innerhalb einer Vielzahl von ansonsten annähernd gleich hell wahrgenommenen Segmenten. Bei so geringem Abstand ist es aufgrund der Größe des gesamten Reflektors jedoch nur sehr schwer möglich, großflächige Helligkeitsunterschiede, beispielsweise einen Verlauf von hell zu dunkel, über das komplette lichttechnische System zu erkennen. Entfernt sich der Beobachter von der Leuchte, ist es bei entsprechend großem Abstand genau umgekehrt. Dann werden helle oder dunkle Segmente nicht mehr als störend wahrgenommen, sondern eher der Verlauf der Helligkeit. Bei noch größeren Entfernungen befindet sich der Verlauf nicht mehr im Mittelpunkt des Interesses, dafür hingegen Helligkeitsunterschiede zwischen verschiedenen leuchtenden Flächen oder zwischen separaten Leuchten.

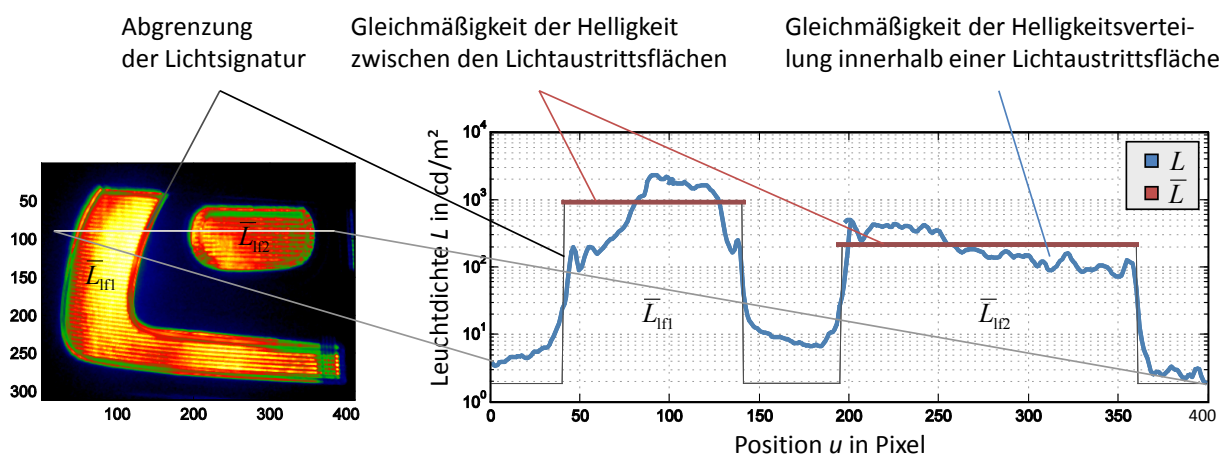
**Tabelle 3.1:** Qualitative Abhängigkeiten der Fokussierung des Betrachters bei der Bewertung der Gleichmäßigkeit und Einordnung der zwei untersuchten Ausprägungen.

Abstand	sehr nah	nah	fern	sehr fern
Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit, Sehwinkel, Ästhetikrelevanz Sicherheitsmerkmal, Einfluss der Umgebungs helligkeit	++	+	-	--
Fokus der Betrachtung	$L_{\min}$ , $L_{\max}$ einzelner Reflektorsegmente oder Scheibenoptiken einer lokalen Nachbarschaft, Streuung der Werte innerhalb der leuchtenden Fläche	Einheit der Facetten oder Optiken, dadurch größerer Zusammenschluss von Regionen gleicher Beschaffenheit	Helligkeitsunterschiede (mittlere Leuchtdichten $L_{\text{mean}}$ ) der einzelnen leuchtenden Flächen	Lichtstärke
Gegenstand der Untersuchung	✓	-	✓	-

Innerhalb dieser Arbeit werden zwei Ausprägungen untersucht:

1. Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung innerhalb einer leuchtenden Fläche
2. Gleichmäßigkeit der Helligkeit zwischen mehreren leuchtenden Flächen

Abbildung 3.3 zeigt die zwei betrachteten Klassen anhand eines Schnittes durch die zwei leuchtenden Flächen der Schlusslichtfunktion einer Signalleuchte. Dem Bild ist noch ein weiteres Gütemerkmal und ein Einflussfaktor auf die Gleichmäßigkeit zu entnehmen: die Abgrenzung der Lichtsignatur, also die Unterscheidung zwischen leuchtender Fläche und ihrer direkten Umgebung. Die Abgrenzung der Signatur wird innerhalb dieses Kapitels ebenfalls betrachtet, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung der Gleichmäßigkeit hat, siehe Abschnitt 3.2.3. Wenn keine klare Abgrenzung existiert oder diese zumindest nicht erkannt wird, ist auch die Bewertung von Helligkeitsunterschieden zwischen mehreren leuchtenden Flächen schwierig bis unmöglich. Des Weiteren wird die klare Abgrenzung benötigt, um Aussagen über die Dauer der Sichtbarkeit von separierten Flächen bei steigender Entfernung zum Fahrzeug treffen zu können, siehe Abschnitt 3.2.4.



**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung zu den Klassen der Gleichmäßigkeit anhand eines Schnittes durch die Leuchtdichteverteilung einer Signalleuchte, welche die Schlusslichtfunktion über mehrere Lichtaustrittsflächen darstellt.

Nachfolgend werden die zwei definierten Klassen der Gleichmäßigkeit näher beschrieben.

### 3.1.1 Einzelne Lichtaustrittsfläche

Die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung innerhalb einer leuchtenden Fläche lassen sich wie folgt definieren:

Erzeugung einer gleichmäßigen Hellempfindung einer Lichtaustrittsfläche einer Lichtfunktion aus allen als relevant definierten Betrachtungsrichtungen.

Hierbei beschreibt „gleichmäßig“ eine nicht existente Helligkeitsänderung oder eine, deren Wertänderungen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle im typischen Beobachtungsfall liegen. Für die Begutachtung ist außerdem die Betrachtungsrichtung maßgeblich, da die meisten Kfz-Leuchten eine starke Richtungscharakteristik des Lichtes aufweisen und somit bereits geringfügige Veränderungen des Blickwinkels, Änderungen innerhalb der wahrgenommenen Helligkeitsverteilung hervorrufen. Des Weiteren sollten Abschattungseffekte innerhalb der Leuchte

nicht vernachlässigt werden, die meist aus geometrischen Gründen, vor allem bei größeren seitlichen Betrachtungswinkeln, auftreten.

In dieser Arbeit werden Texturen, also gewollte sichtbare Strukturen innerhalb der leuchtenden Fläche nicht gesondert betrachtet. Der Vollständigkeit halber sollen diese aber ebenfalls kurz genannt werden. Eine Textur ergibt sich durch Optiken auf der Außen- oder Zwischenlichtscheibe einer Leuchte, den Segmenten des Reflektors oder den Auskoppeloptiken eines Lichtleiters. Diese regelmäßigen, periodischen Wiederholungen von geometrischen Grundelementen stellen somit eine Art Gleichmäßigkeit auf einer höheren Ebene dar. Über die Textur lässt sich die Form und die Dreidimensionalität einer Leuchte beschreiben. Die kleinen Strukturen verändern die Wirkung der Leuchte, aufgrund von Reflektionen und Schattenbildungen, permanent. Die Textur unterstützt die räumliche Erfassung einer Fläche und gibt dem Beobachter die Möglichkeit, die leuchtende Fläche zur Lichtquelle in Relation zu setzen [Koe08]. Im Normalfall gibt der Designer den Verlauf und die Anmutung der Textur beispielsweise durch Festlegung der Art und Größe der Optikstrukturen auf den Lichtscheiben vor.

### 3.1.2 Mehrere Lichtaustrittsflächen

Die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Helligkeit zwischen mehreren leuchtenden Flächen einer Lichtfunktion lassen sich wie folgt definieren:

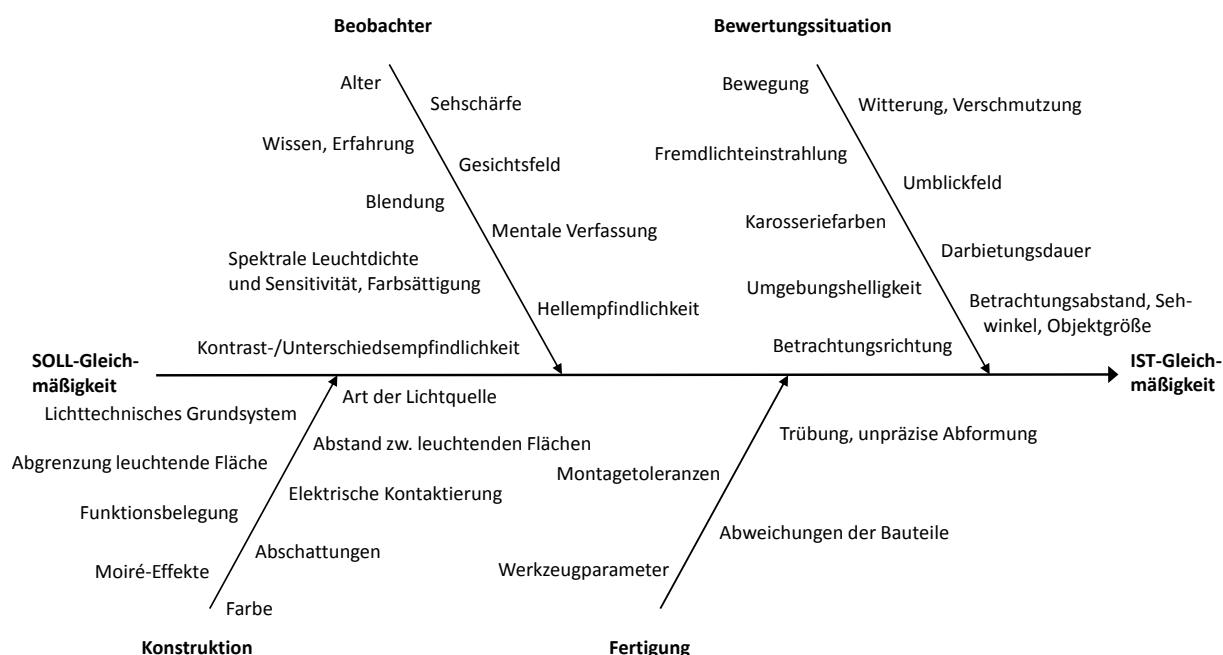
Erzeugung einer gleichmäßigen Hellempfindung aller, an einer Lichtfunktion beteiligten Lichtaustrittsflächen aus allen als relevant definierten Betrachtungsrichtungen.

Die relevanten Betrachtungsrichtungen lassen sich beispielsweise aus der räumlichen Lichtverteilung ableiten, welche durch den Gesetzgeber vorgegeben wird, siehe Abschnitt 2.2. Wie lang eine gleichmäßige Hellempfindung vorliegt, ist maßgeblich von äußeren Einflussfaktoren, wie der Umfeldhelligkeit und dem Betrachtungsabstand, abhängig. Die Einflussfaktoren werden in Abschnitt 3.2 näher erläutert.

Damit die oben genannte Anforderung abgeprüft werden kann, muss ein Maß zur Beschreibung des Helligkeitseindrucks eines Beobachters gefunden werden. Innerhalb dieser Arbeit wird der arithmetische Mittelwert der Leuchtdichte aller Messpunkte einer leuchtenden Fläche als der Wert festgelegt, der dem mittleren Helligkeitseindruck des Beobachters am ehesten entspricht, vgl. [Rip01a, Arm01]. Dabei bleiben einige Effekte, welche die Wahrnehmung von Signalleuchten beeinflussen können [Sch07], wie beispielsweise der Grad der Farbsättigung, unberücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Effekte für alle betrachteten Leuchten gleichermaßen auftreten und die Effektstärke klein gegenüber dem beobachteten Wert ist.

## 3.2 Einflussfaktoren auf die Beurteilung

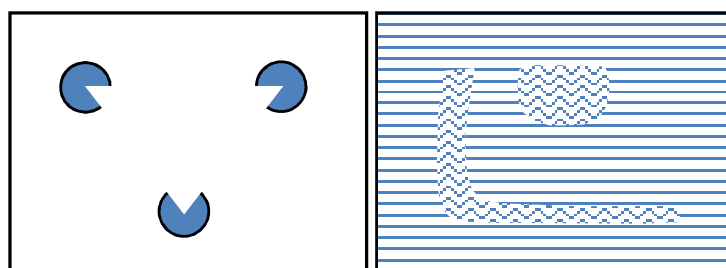
In Abbildung 1.1 auf Seite 15 werden einige Auffälligkeiten an typischen Signalleuchten aufgezeigt, die bei der Leuchtenentwicklung besonders im Fokus stehen und im Sinne des hohen Qualitätsanspruches vermieden werden sollen. Abbildung 3.4 zeigt die identifizierten Einflussfaktoren, die zu diesen Auffälligkeiten führen können.



**Abbildung 3.4:** Identifizierte Einflussfaktoren auf die Beurteilung der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die wahrgenommene Gleichmäßigkeit durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. In der Arbeit werden einige konstruktive und viele der wahrnehmungs- und situationsbezogenen Faktoren näher untersucht.

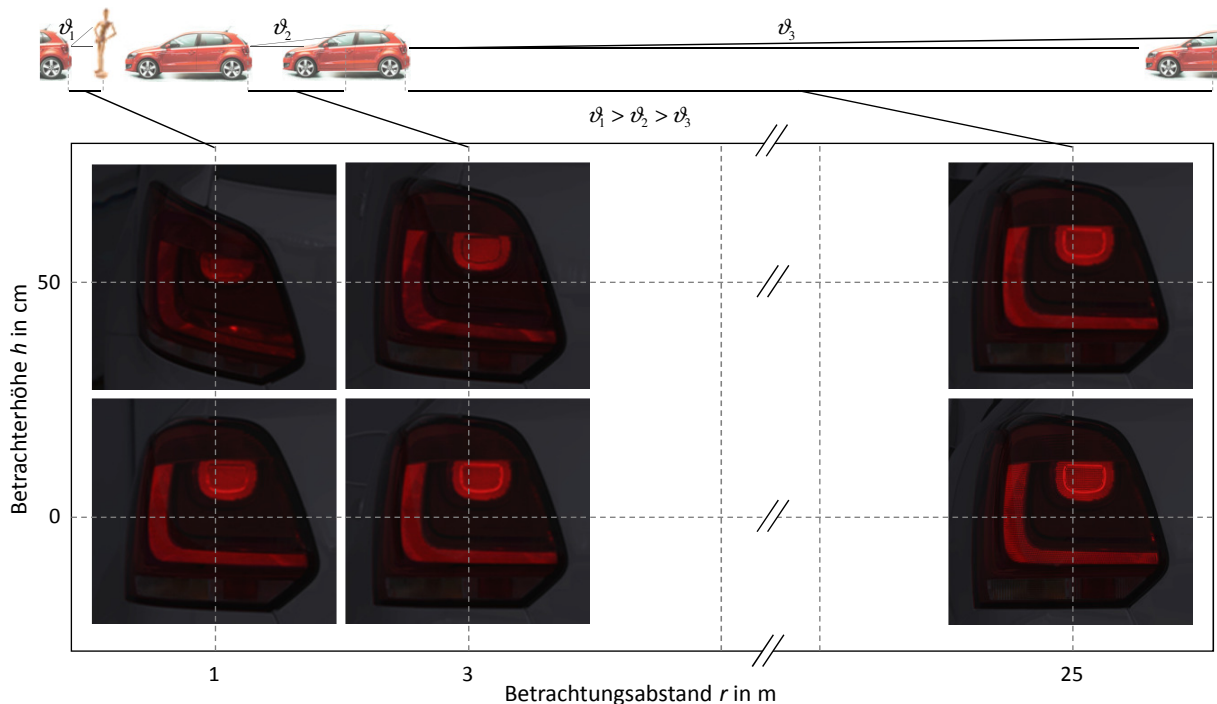
Nicht zu unterschätzen ist der Einfluss der eigenen Erfahrung und des Wissens über ein zu bewertendes Objekt. Das menschliche Sehvermögen orientiert sich am Kontext der gerade betrachteten Szene. Eine Bewertung erfolgt immer in Abhängigkeit der lokalen Umgebung. Dies erklärt zum Teil, warum es optische Täuschungen gibt und wie diese funktionieren. Das Erkennen von Objekten erfolgt zu einem großen Teil aus dem Wissen des Menschen zum gerade betrachteten Objekt. Das visuelle System des Menschen ist äußerst leistungsfähig. Der Mensch kann beispielsweise Formen erkennen, obwohl sie gar nicht dargestellt werden, wie beispielsweise das weiße Dreieck in Abbildung 3.5 links. Er kann scharfe Grenzen zwischen unterschiedlichen Texturen erkennen, siehe Abbildung 3.5 rechts. Um solche Aufgaben maschinell zu lösen, sind sehr spezielle Algorithmen notwendig [Jäh05]. Schon die Bezeichnung „spezieller“ Algorithmus schließt eine Verallgemeinerung und damit die breite Anwendbarkeit der Methoden auf eine Vielzahl von Leuchten praktisch aus. Der Fokus der Arbeit liegt daher in der Schaffung eines möglichst allgemeingültigen Modells.



**Abbildung 3.5:** Beispiele für die Leistungsfähigkeit des visuellen Systems, links: Kanizsa-Dreieck; rechts: verschiedene Texturen

Nachfolgend werden der Betrachtungsabstand, die Betrachtungsrichtung, die Abgrenzung der leuchtenden Fläche und der Abstand zwischen unterschiedlichen leuchtenden Flächen näher erläutert.

### 3.2.1 Betrachtungsabstand



**Abbildung 3.6:** Variation des vertikalen Betrachterwinkels über Veränderung des Betrachtungsabstandes.

Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch das Schlusslicht einer Kfz-Leuchte aus drei verschiedenen Abständen  $r = \{1 \text{ m}; 3 \text{ m}; 25 \text{ m}\}$  und aus zwei verschiedenen Betrachterhöhen  $h = \{0 \text{ cm}; 50 \text{ cm}\}$ . Dem Bild ist zu entnehmen, dass die Betrachtung einer einzigen Richtung für die Gleichmäßigkeit nicht ausreichend ist und dass eine starke Abhängigkeit zwischen der wahrgenommenen Gleichmäßigkeit und dem Betrachtungsabstand existiert. Dies lässt sich mit den folgenden Punkten begründen:

#### 1. Perspektive:

Die Perspektive mit der ein Objekt gesehen wird, ergibt sich aus dem Betrachtungsabstand und nicht etwa aus der Brennweite des Objektivs oder des Auges. Es sind somit, je nach Betrachtungsabstand, andere Teile der optischen Flächen des Reflektors oder der Zwischenlichtscheibe für die wahrgenommene Helligkeit und Gleichmäßigkeit verantwortlich.

#### 2. Wahrnehmung:

Wie bereits in Tabelle 3.1 gezeigt, erfolgt außerdem eine Veränderung des Betrachtungsfokusses in Abhängigkeit vom Abstand. Je weiter sich der Betrachter von der Leuchte entfernt, desto weniger Details werden innerhalb der leuchtenden Fläche erkannt, umso wichtiger werden großflächige Helligkeitsänderungen.

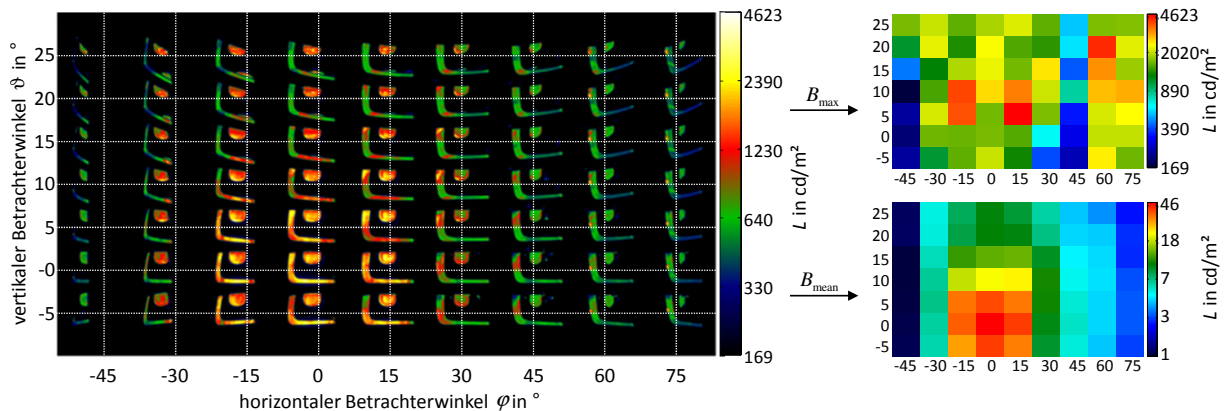
### 3. Horizontaler und vertikaler Betrachtungswinkel:

Wenn sich die Augen des Betrachters nicht auf Höhe der Leuchte befinden, sondern, wie im Straßenverkehr oder der Bewertungssituation üblich, leicht oberhalb und seitlich, wird die Leuchte unter einem bestimmten Winkel gesehen, der sich bei Vergrößerung oder Verringerung des Betrachtungsabstandes stetig ändert. Neben der im ersten Punkt erläuterten Abhängigkeit der Perspektive, erfolgt hier also zusätzlich noch eine Veränderung des vertikalen und horizontalen Betrachtungswinkels.

Die Betrachtungsrichtung, also der Winkel unter dem die Leuchte gesehen wird, ist auch bei festem Betrachtungsabstand ein großer Einflussfaktor auf die wahrgenommene Gleichmäßigkeit. Im nächsten Abschnitt wird diese Richtungsabhängigkeit näher betrachtet.

### 3.2.2 Betrachtungsrichtung

Nicht nur bei Hinterherfahrt, sondern auch bei der Bewertungs- oder Verkaufsraumsituation wird eine Leuchte nicht aus der optischen Achse heraus betrachtet. Die sowohl horizontal als auch vertikal symmetrische Lichtverteilung der gesetzlichen Anforderungen birgt jedoch eine auf die Betrachtungsrichtung  $\vartheta = 0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  bezogene Hauptrichtung der Gleichmäßigkeit in sich, die in der Realität eher selten auftritt. Dies stellt die Lichttechniker vor eine große Herausforderung, da der Bereich in dem eine Leuchte gleichmäßig erscheint, idealerweise alle möglichen Betrachtungsrichtungen einschließen sollte. Für die messgerätebasierte Erfassung der Gleichmäßigkeit bedeutet dies außerdem, dass unabhängig vom verwendeten Bewertungsalgorithmus möglichst viele Betrachtungsrichtungen mit erfasst werden sollten, um eine der wahrgenommenen Gleichmäßigkeit entsprechende Bewertung treffen zu können.



**Abbildung 3.7:** links: Leuchtdichteverteilungen einer Schlusslichtfunktion aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen weisen geometrische und quantitative Veränderungen auf; rechts: Ergebnisverteilungen der maximalen und der mittleren Leuchtdichten einer jeden Verteilung des linken Bildes.

Für eine Bewertung aus ästhetischen Gesichtspunkten sind sehr große Winkelbereiche und sehr kleine Winkelschrittweiten interessant. Neben der Frage nach einem geeigneten Modell für die Bewertung ergeben sich zwei weitere Problemstellungen. Zum einen vergrößert sich der Messaufwand durch große Winkelbereiche und feine Winkelschrittweiten immens, zum anderen wird mit steigender Anzahl an betrachteten Richtungen eine immer größer werdende Menge an auswertbaren Daten erzeugt, was die Präsentation der Ergebnisse erschwert, was jedoch durch eine adaptive Methode, wie sie in Abschnitt 5.1.3 ab Seite 88 vorgestellt wird, gelöst werden kann.

Abbildung 3.7 zeigt den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansatz zur Ergebnisdarstellung. Die endgültigen Ergebnisse einer Messung ähneln dabei stark den im Automobilbau üblichen räumlichen Lichtstärkeverteilungen, die auch als Theta-Phi-Diagramme bezeichnet werden. Im Fall dieser Arbeit entsprechen  $\vartheta$  und  $\varphi$  nicht mehr den Raumwinkeln der gemessenen Lichtstärken, sondern den Richtungen aus denen auf die Leuchte geschaut wird. Die Werte des Diagramms entsprechen außerdem keinen Lichtstärken, sondern der gerade betrachteten Größe der gemessenen Leuchtdichteverteilungen. Die so erzeugten betrachtungsrichtungsabhängigen Ergebnisverteilungen werden mit  $B$  bezeichnet. In der Abbildung sind rechts die Ergebnisverteilungen für die maximalen und die mittleren Leuchtdichten dargestellt.

Eine Beeinflussung der Gleichmäßigkeit bezogen auf die Betrachtungsrichtung ergibt sich maßgeblich aus den geometrischen Eigenschaften der Leuchte, die in Kapitel 2.1 ab Seite 21 erläutert sind. Aus größeren seitlichen Blickwinkeln gesehen, verändert sich die Größe der leuchtenden Fläche aufgrund der projizierten Darstellung. Außerdem kann es zu Abschattungen durch Bauteile innerhalb der Leuchte kommen, wodurch die sichtbare leuchtende Fläche nicht mehr mit der Lichtaustrittsfläche übereinstimmt. Softwaremethoden, welche auf Basis von Leuchtdichtewerten eine Bewertung durchführen, können diese Abweichungen nicht erkennen. Nachfolgend wird ein Ansatz zur Ermittlung der leuchtenden Fläche vorgestellt, der aus allen relevanten Betrachtungsrichtungen stabil funktioniert und nicht auf Leuchtdichtedaten operiert.

### 3.2.3 Abgrenzung der Lichtaustrittsfläche

Eine automatische Beurteilung von Signalleuchten hinsichtlich der Sichtbarkeit der leuchtenden Flächen oder der Gleichmäßigkeit bedingt, dass der Messsoftware die genaue Lage, Form und Größe der leuchtenden Flächen einer Signallichtfunktion bekannt sein müssen. Dadurch wird es der Bewertungssoftware ermöglicht, mittels Bildverarbeitung zu bestimmen, ob die leuchtenden Flächen vollständig sichtbar sind und homogen erscheinen oder ob es aus bestimmten Betrachtungsrichtungen zu Abschattungen oder Reflektionen an Bauteilen innerhalb der Leuchte kommt. Üblicherweise kommen zur Detektion der leuchtenden Flächen Gradientenanalysen oder Leuchtdichteschwellwerte zum Einsatz. Ersteres basiert auf der Annahme, dass die untersuchte leuchtende Fläche weit höhere Leuchtdichten aufweist als die lokale Umgebung. Daraus ergibt sich, dass der Gradient zwischen zwei benachbarten Bildpunkten genau an der Umrandung der leuchtenden Fläche am größten sein sollte. Die Ermittlung der leuchtenden Fläche über einen Leuchtdichteschwellwert basiert auf dem gleichen Grundgedanken: alle Bildpunkte oberhalb eines Schwellwertes liegen innerhalb der gesuchten leuchtenden Fläche. Beide Verfahren sind für eine automatische Bewertung einer Vielzahl von Leuchtdichteverteilungen vollkommen ungeeignet, da Parameter wie der Schwellwert der Leuchtdichte nicht einheitlich festgelegt werden können und zu viele Abhängigkeiten existieren, wie beispielsweise die Auflösung der Leuchtdichtemesskamera, die Beschaffenheit der Leuchte oder die Messbedingungen.

Ein weiteres praktisches Problem besteht darin, dass innerhalb einer leuchtenden Fläche zwar die Gradienten interessieren, die der Umrandung jedoch gerade nicht. Hierbei stößt die automatische Auswertung ohne genaue Kenntnis über den Ort der leuchtenden Fläche an ihre Grenzen. Beiden Verfahren gemeinsam ist, dass sie bei Abschattungen oder sehr hellen Reflektionen durch Bauteile der Leuchte fehlerhafte Flächen ermitteln und damit die falsche Datenbasis für die Bewertung benutzen. Die sogenannte Signatursichtbarkeit, also die Abgrenzung der Signatur als Güte Merkmal einer Signalleuchte lässt sich auf diesen Wegen nicht bewerten.



Wenn allerdings ein Weg zur korrekten Beschreibung der Lichtaustrittsfläche aus allen Betrachtungsrichtungen existiert, liegt der Verdacht nahe, dass relativ einfache statistische Methoden zur Bewertung der Gleichmäßigkeit zur Anwendung kommen können. In Abschnitt 5.2 wird gezeigt, wie CAD-Daten von Leuchten für jede Betrachtungsrichtung perspektivisch so transformiert werden können, dass sie innerhalb der Leuchtdichteverteilung als Maskierung der leuchtenden Fläche vom Rest der Leuchte genutzt werden können. Über die nachfolgende Gleichung, wird diese binäre Maskierung einer leuchtenden Fläche mathematisch beschrieben:

$$M_{lf_1}(u, v) = \begin{cases} 1, & (u, v) \in lf_1 \\ 0, & (u, v) \notin lf_1 \end{cases} \quad (3.1)$$

Die Abmessung und Pixelauflösung der Maske entspricht dabei exakt der Leuchtdichteverteilung und ist für eine beispielhafte leuchtende Fläche  $lf_1$  definiert. Die maskierten Leuchtdichteverteilungen werden mit einem Hochkomma gekennzeichnet und ergeben sich dann aus einer Multiplikation der Leuchtdichteverteilung und der binären Maskierung zu:

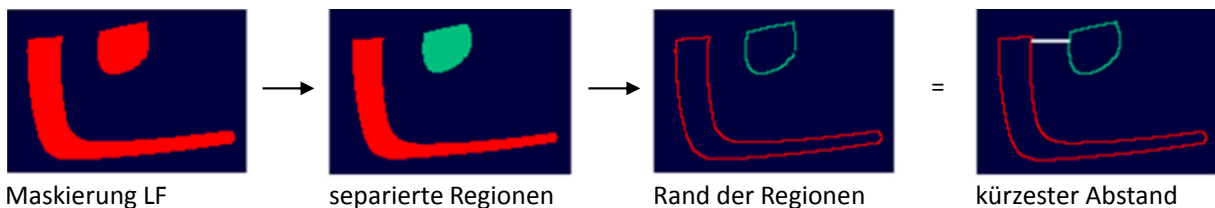
$$L'_{lf_1}(u, v) = L(u, v) \cdot M_{lf_1}(u, v). \quad (3.2)$$

Auf diesem Wege können Leuchtdichteverteilungen anhand dieser geometrischen Zusatzinformationen in relevante und irrelevante Bestandteile zerlegt werden, gänzlich unabhängig von den tatsächlich vorliegenden Leuchtdichtewerten, Gradienten oder konstruktiven Gegebenheiten. Daraus ergeben sich eine Vielzahl von Bewertungsmöglichkeiten, die sich in einer unmaskierten Leuchtdichteverteilung als wenig aussagekräftig erweisen würden.

Sobald die geometrischen Orte der Lichtaustrittsflächen bekannt sind, kann auch der Abstand zwischen diesen berechnet werden, was im nächsten Abschnitt erläutert wird.

### 3.2.4 Abstand zwischen den Lichtaustrittsflächen

Wenn mehrere Flächen zu einer Lichtfunktion gehören, ist für die Entwickler von Interesse, bis zu welchem Betrachtungsabstand diese noch als getrennt voneinander wahrnehmbar sind. Er lässt sich relativ aufwendig mit einem Leuchtenprototyp im Lichtkanal untersuchen oder aber die Entfernung wird berechnet. Dazu ist es nötig, den Ort und die Größe des geringsten Abstandes von zwei Lichtaustrittsflächen zu kennen. Dieser Abstand wird als Signaturabstand bezeichnet. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Ansatz zur Ermittlung des Signaturabstandes entwickelt, der in Abbildung 3.8 gezeigt und nachfolgend erläutert wird.



**Abbildung 3.8:** Teilschritte zur Bestimmung des Signaturabstandes. Der weiße Strich im rechten Bild zeigt die kürzeste Verbindung zwischen zwei Lichtaustrittsflächen.

Ausgangspunkt bildet ein Binärbild, welches beispielsweise über die im letzten Abschnitt vorgestellte Methode erzeugt wird. Auf dieses Binärbild wird anschließend die in Abschnitt 2.6.3



vorgestellte sequentielle Regionenmarkierung angewendet, um die Lichtaustrittsflächen mit jeweils unterschiedlichen Indizes zu beschreiben. Über eine Erosion (Abschnitt 2.6.4) werden die separierten Regionen abgetragen und das Ergebnis dieser Operation vom Ausgangsbild abgezogen. Das Resultat dieser Operation ist ein Diskontinuitätsbild, also ein Bild, welches nur noch die Umrandung der zwei Lichtaustrittsflächen enthält. Im vorletzten Schritt wird die euklidische Distanz  $b_{\text{pixel}}$  zwischen jedem Pixel  $\mathbf{p}_{\text{lf}_1}$  der ersten und jedem Pixel  $\mathbf{p}_{\text{lf}_2}$  der zweiten Fläche über nachfolgende Gleichung berechnet:

$$b_{\text{pixel}}(\mathbf{p}_{\text{lf}_1}, \mathbf{p}_{\text{lf}_2}) = \|\mathbf{p}_{\text{lf}_1} - \mathbf{p}_{\text{lf}_2}\|_2 = \sqrt{(u_{\text{lf}_1} - u_{\text{lf}_2})^2 + (v_{\text{lf}_1} - v_{\text{lf}_2})^2}. \quad (3.3)$$

Die euklidische Distanz ist für den kontinuierlichen Raum definiert, lässt sich über obige Definition jedoch auch auf diskrete Zahlenfelder übertragen. Der kleinste Wert für  $b_{\text{pixel}}$  und der Ort der zugehörigen Pixel wird gespeichert. Die Einheit von  $b_{\text{pixel}}$  entspricht Pixeln. Über die nachfolgende Gleichung lässt sich bei Kenntnis des Messabstandes  $r$ , der Abmessung eines Pixels  $d_{\text{pixel}}$  und der Brennweite  $f$  des verwendeten Objektivs der Signaturabstand in mm berechnen:

$$b(\mathbf{p}_{\text{lf}_1}, \mathbf{p}_{\text{lf}_2}) = b_{\text{pixel}}(\mathbf{p}_{\text{lf}_1}, \mathbf{p}_{\text{lf}_2}) \cdot \frac{r \cdot d_{\text{pixel}}}{f}. \quad (3.4)$$

In Abbildung 3.8 rechts ist die kürzeste Verbindung zwischen den zwei Lichtaustrittsflächen innerhalb der gerade betrachteten Richtung auf die Leuchte eingezeichnet. Die Gleichung für die Sehschärfe (2.2) auf Seite 30 lässt sich nach dem Betrachtungsabstand wie folgt umstellen:

$$r = \frac{b}{\tan \frac{1}{60 \cdot s}}. \quad (3.5)$$

Somit lassen sich für verschiedene Sehschärfen  $s$  maximal zulässige Betrachtungsabstände ermitteln. Tabelle 3.2 zeigt übliche Signaturabstände  $b$  mit den sich daraus ergebenden Betrachtungsabständen  $r$ , bei denen zwei Lichtaustrittsflächen als gerade noch getrennt voneinander gesehen werden können. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um grobe Orientierungen für den Entwickler, da die Sehschärfe von der jeweiligen Person und von vielen äußeren Einflussfaktoren, wie der Umgebungshelligkeit und in dem Fall auch der Lichtfarbe, abhängig ist.

**Tabelle 3.2:** Maximaler Betrachtungsabstand, um bei gegebener Sehschärfe und gegebenem Signaturabstand, zwei Flächen noch als getrennt voneinander wahrnehmen zu können.

Signaturabstand $b$ in mm	35	35	35	35	25	25	25	25	15	15	15	15
Sehschärfe $s$	1.00	0.90	0.80	0.70	1.00	0.90	0.80	0.70	1.00	0.90	0.80	0.70
Betrachtungsabstand $r$ in m	120	108	96	84	86	77	69	60	52	46	41	36

Die Berechnung des minimalen Abstandes ist aus allen Betrachtungsrichtungen durchzuführen, da somit eine Aussage darüber getroffen werden kann, ab welchem horizontalen oder vertikalen Winkel eine reale Verschmelzung der Lichtaustrittsflächen erfolgt.

### 3.3 Ausgewählte Ansätze zur softwarebasierten Bewertung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde dargestellt, dass es für die Bewertung der Gleichmäßigkeit wichtig ist, nicht nur aus einer einzigen Richtung auf die Leuchte zu schauen, un-

terschiedliche Betrachtungsabstände zu verschiedenen Arten der Bewertung führen und eine genaue Abgrenzung der leuchtenden Flächen von Nöten ist, um eine sinngemäße Bewertung vornehmen zu können. In diesem Abschnitt werden nun Ansätze zur Bewertung der Gleichmäßigkeit vorgestellt. Ziel ist dabei, eine möglichst allgemeingültige Bewertungsmethode zu entwickeln, die unabhängig vom Design der Leuchte und dem verwendeten Optikkonzept ist.

Die Modellbildung unterliegt dem Trilemma von Allgemeingültigkeit, Genauigkeit und Einfachheit der Forschungsstrategien nach Weik, in [BH09]. Nach diesem Modell können entweder einfache und genaue, genaue und allgemeine oder allgemeine und einfache Strategien angewendet werden. Es können nie alle drei Ideale gleichsam erreicht werden. Je genauer ein Modell wird, desto spezifischer wird der Untersuchungsfall oder desto komplexer wird es. In dieser Arbeit wird die Genauigkeitsanforderung der Einfachheit des Modells und der Allgemeingültigkeit der Anwendbarkeit hintenangestellt.

Im DIN-Vorschriftenwerk sind bereits verschiedene Methoden zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit von Lichtsignalanlagen definiert, die nachfolgend kurz betrachtet und hinsichtlich einer Anwendbarkeit auf Kfz-Signalleuchten bewertet werden. Die einfachen Verfahren definieren ein maximales Verhältnis zwischen  $L_{\min}$  und  $L_{\max}$  von 1 : 10 [DIN12368, Abschnitt 6.5] oder 1 : 6 [DIN675271, Abschnitt 5.3.2]. Wenn das Verhältnis größer ist, wird die Lichtaustrittsfläche als nicht mehr gleichmäßig ausgeleuchtet angenommen. Diese Methoden sind anwendbar für Lichtaustrittsflächen mit nur kleinen lokalen, aber großen globalen Änderungen der Leuchtdichtewerte. Die Methoden sind also nur anwendbar, wenn eine gewisse Grundgleichmäßigkeit anzunehmen ist. Außerdem ergibt sich eine überproportional große Abhängigkeit zum Durchmesser des Messpunktes. Je kleiner die Messfelder werden, desto größere Leuchtdichteunterschiede werden erwartet.

Eine weitere Methode aus dem Bereich der Arbeitsplatzbeleuchtung berücksichtigt die Änderungen innerhalb der räumlichen Verteilung, indem die beleuchtete Fläche in  $10 \times 10 = 100$  gleichgroße Felder unterteilt und anschließend das Verhältnis  $g_3$  zwischen Standardabweichung und Mittelwert der gemessenen Beleuchtungsstärken bestimmt wird [DIN50358, Abschnitt 3.6.2]. Der berechnete Wert entspricht dabei dem Variations- oder auch Variabilitätskoeffizient nach Pearson, der eine Kenngröße der mathematischen Statistik ist. In der Norm wird festgelegt, dass der Wert  $\leq 1$  sein sollte, damit von einer guten Gleichmäßigkeit gesprochen werden kann. Allerdings handelt es sich hierbei um die Bewertung einer beleuchteten und nicht einer selbstleuchtenden Fläche. Der Variationskoeffizient wird jedoch auch zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Leuchtdichten im Gesichtsfeld empfohlen [Gal83], was einer selbstleuchtenden Fläche entspricht.

Die zuvor genannte Methode der Arbeitsplatzbeleuchtung wird durch Ladenburger auch für die Bewertung von Kfz-Signalleuchten vorgestellt [Lad11]. In der genannten Arbeit werden jedoch ebenfalls nur Beleuchtungsstärken und keine Leuchtdichten betrachtet. Interessanterweise teilt der Autor die Gleichmäßigkeit ebenfalls in zwei Gruppen ein. Es wird zwischen interner (innerhalb einer Lichtaustrittsfläche) und vergleichender (mehrere Lichtaustrittsflächen) Gleichmäßigkeit unterschieden. Des Weiteren wird ebenfalls darauf hingewiesen, dass die Betrachtungsrichtung für die Gleichmäßigkeit maßgeblich ist und eine Gleichmäßigkeit über einen großen Bereich der möglichen Betrachtungsrichtungen nur mit einem eher uneffizienten optischen System erreicht werden kann. Es erfolgt jedoch keine Aussage dazu ob überhaupt und wie aus den unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen die zu bewertenden Flächen ausgewählt werden, was für die genannte Bewertungsmethode jedoch unerlässlich ist. Inwieweit die Beleuchtungsstärke

für unterschiedliche Betrachtungsrichtungen, beispielsweise über den Raumwinkel begrenzende Blenden, überhaupt ein geeignetes Maß ist, wird ebenfalls nicht diskutiert.

Inwieweit sich eines der genannten Verfahren oder Kombinationen für Kraftfahrzeugsignalleuchten mit ihren typischen hohen Ortsfrequenzen und großen Richtungsabhängigkeiten eignet, wird innerhalb der Arbeit betrachtet. Tabelle 3.3 zeigt alle untersuchten Kriterien und eine Bewertung hinsichtlich der allgemeinen Anwendbarkeit, der Einfachheit und der Genauigkeit des Modells. Die praktische Anwendung der genannten Kriterien erfolgt zur Auswertung der lichttechnischen Untersuchungen in Abschnitt 4.2.

**Tabelle 3.3:** *Untersuchte Kriterien der softwarebasierten Bewertung, unterschieden nach Einsatzfähigkeit für die komplette Leuchtdichtevertelung (LDV) oder nur der leuchtenden Fläche (LF) und nach den drei Modellmerkmalen Allgemeingültigkeit (Allg.), Einfachheit (Einf.) und Genauigkeit (Gen.).*

Kriterium	LDV	LF	Allg.	Einf.	Gen.	Anmerkungen
minimale Leuchtdichte	-	✓	✓	✓	-	große Abhängigkeit zur Kameraauflösung
maximale Leuchtdichte	✓	✓	✓	✓	-	große Abhängigkeit zur Kameraauflösung
mediane Leuchtdichte	-	✓	✓	✓	-	sinnvoller Einsatz, bei Vergleich zu Mittelwert
Gradientenschnitt	-	✓	-	✓	-	große Abhängigkeit zur Position der Schnitte
Gradientenanalyse	-	✓	-	✓	✓	lageunabhängig
mittlere Leuchtdichte	✓	✓	✓	✓	-	Maß für wahrgenommene Helligkeit der Leuchte und der LF
Standardabweichung	-	✓	✓	✓	-	geeignetes Streuungsmaß der Statistik
Variationskoeffizient	✓	✓	✓	✓	-	Standardabweichung in Mittelwertseinheiten
Detektion von Flecken	-	✓	✓	-	✓	Detektion Lichtquelle, Lampenlöcher
Gabor-Transformation	-	✓	✓	-	✓	Überprüfung der Regelmäßigkeit von Texturen
Hough-Transformation	✓	-	-	✓	✓	automatische Detektion der LF, wenn Form bekannt

Nachfolgend werden für die zwei definierten Klassen der Gleichmäßigkeit, Ansätze zur softwarebasierten Bewertung beschrieben.

### 3.3.1 Einzelne Lichtaustrittsfläche

In dieser Arbeit werden für die Bewertung einer einzelnen leuchtenden Fläche drei Ansätze näher betrachtet. Zum einen wird ein allgemeines Modell bereitgestellt, welches unabhängig vom lichttechnischen Prinzip verlässliche Aussagen zur Gleichmäßigkeit liefert. Zum anderen werden zwei angepasste Modelle entworfen, um bekannte Einschränkungen, die sich beispielsweise durch den Bautyp der betrachteten Leuchten ergeben, mit zu berücksichtigen und somit präzisere Aussagen zur Gleichmäßigkeit zu treffen. Zu Beginn des Abschnittes wird der Variationskoeffizient als Maß für die Gleichmäßigkeit einer leuchtenden Fläche vorgestellt.

Der Variationskoeffizient berechnet sich im Allgemeinen aus dem Verhältnis der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert der betrachteten Messgröße:

$$V_x = \frac{S_x}{\bar{X}}, \text{ mit } \bar{X} > 0. \quad (3.6)$$

Damit entspricht er der Angabe der Standardabweichung in Einheiten des Mittelwertes, womit der Bezug zur mittleren Leuchtdichte als dem Maß für die wahrgenommene Helligkeit hergestellt ist. Die Standardabweichung berechnet sich nach:

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( X_i - \frac{\sum_{i=1}^n X}{n} \right)^2}. \quad (3.7)$$

Unter Verwendung von Gleichung (3.2) ergibt sich für die leuchtende Fläche mit dem Index 1 folgende Gleichung:

$$V'_{lf_1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{S_L \cdot Z_L - 1} \sum_{u=1}^{S_L} \sum_{v=1}^{Z_L} \left( L(u, v) - \overline{L'_{lf_1}} \right)^2}}{\overline{L'_{lf_1}}}. \quad (3.8)$$

Die innerhalb der in Kapitel 4 vorgestellten Untersuchung betrachteten Leuchten werden unter anderem mithilfe des Variationskoeffizienten hinsichtlich der Gleichmäßigkeit bewertet und die Tauglichkeit überprüft.

Nachfolgend werden zwei Ansätze vorgestellt, um spezielle Effekte innerhalb einer leuchtenden Fläche zu betrachten. Die Modelle erheben keinen Anspruch auf allgemeine Anwendbarkeit, sondern sind nur für spezifische Optikkonzepte anwendbar. Diese Verfeinerung im Gegensatz zum allgemeinen Ansatz empfiehlt sich immer dann, wenn eine Vielzahl von lichttechnisch ähnlichen Konzepten untersucht werden sollen oder immer wieder ähnliche Kritikpunkte zu Leuchtenkonzepten erfolgen. Beispielsweise werden durch die Qualitätssicherung häufig helle Streifen oder Kanten und dunkle oder helle Flecken innerhalb der leuchtenden Flächen beanstandet. Nachfolgend werden zwei Methoden beschrieben, die dem Auffinden dieser Streifen und Flecken dienen und fester Bestandteil innerhalb der Bewertungssoftware sind. Streifen sind Artefakte mit hohem Gradienten und damit großen Kontraständerungen auf kurzen geometrischen Strecken. Flecken sind Artefakte mit deutlich höheren oder niedrigeren Leuchtdichten, verglichen mit der mittleren Leuchtdichte der leuchtenden Fläche.



**Abbildung 3.9:** Teilschritte der Gradientenbewertung zum Auffinden von hellen oder dunklen Streifen innerhalb der leuchtenden Flächen.

Abbildung 3.9 zeigt die Teilschritte der Gradientenbewertung zum Auffinden von hellen Streifen innerhalb der Leuchtdichteverteilung. Zu Beginn wird über den in Abschnitt 2.6.2 auf Seite 40 vorgestellten Sobeloperator  $\mathcal{G}$  eine richtungsunabhängige Kantendetektion durchgeführt. Anschließend wird das Kantenbild mit einer mittels Erosion verkleinerten Maskierung  $M_e$  überlagert:

$$G' = \sqrt{(L * \mathcal{G}_u)^2 + (L * \mathcal{G}_v)^2} \cdot M_e. \quad (3.9)$$

Die Erosion ist nötig, damit bei der Gradientenanalyse nicht die Umrandungen der leuchtenden Flächen mit betrachtet werden. Dies würde die Ergebnisse massiv verfälschen, da die Gradienten am Rand der leuchtenden Fläche am größten sind, diese hohen Werte aber gar nicht gesucht werden. Durch eine Überlagerung mit einer leicht verkleinerten Maskierung kann dieses Problem einfach umgangen werden. Anschließend erfolgt eine sequentielle Markierung aller gefundenen hohen Gradienten und anhand der beinhalteten Pixel jeder markierten Gradientenregion eine Berechnung der Größe der projizierten metrischen Fläche über nachfolgende Gleichung:

$$A_{\text{stripe}} = \sum \text{Pixel} \cdot \left( \frac{r \cdot d_{\text{pixel}}}{f} \right)^2. \quad (3.10)$$

Innerhalb der Bewertung werden nur Streifen berücksichtigt, die eine gewisse Mindestgröße haben, um Gradienten, die nur zwischen einzelnen benachbarten Pixeln auftreten, auszuschließen. Die Mindestgröße sollte ein Vielfaches der Auflösungsgrenze sein und ergab sich in Vorversuchen zu  $15 \text{ mm}^2$ . Aus jeder betrachteten Richtung wird nur der wertmäßig größte Gradient ermittelt und in der Ergebnisverteilung  $B_G$  gespeichert.

Der zweite Ansatz dient zum Auffinden von dunklen und hellen Flecken innerhalb der leuchtenden Flächen. Abbildung 3.10 zeigt das prinzipielle Vorgehen bei der Detektion dunkler Flecken innerhalb einer leuchtenden Fläche. Zuerst erfolgt eine Maskierung der leuchtenden Fläche, nach Gleichung (3.2). Anschließend wird die mittlere Leuchtdichte  $\bar{L}'_{\text{lf}}$  der leuchtenden Fläche berechnet. Die Segmentierung einer Gruppe zusammenhängender relativ zum Mittelwert dunkler Pixel erfolgt derart, dass alle Pixel, deren Werte oberhalb eines Schwellwertes liegen, zu 0 gesetzt werden. Der Startschwellwert für dunkle Pixel entspricht der minimalen Leuchtdichte der leuchtenden Fläche. Es sollten somit bereits im ersten Durchlauf nicht alle Pixel innerhalb der leuchtenden Fläche 0 sein. Es erfolgt wieder eine Separierung der gefundenen Pixel über die Regionenmarkierung und eine Berechnung der Größe derer metrischen Flächen. Ist bei keiner Fläche das Abbruchkriterium erfüllt, wird der Schwellwert dem Mittelwert angenähert und die Auswertung beginnt von vorn. Erfüllt eine zusammenhängende Gruppe von Pixeln die minimale Flächenanforderung, wird der gerade berechnete Schwellwert in der Ergebnisverteilung gespeichert. Für helle Flecken funktioniert die Berechnung ebenso, nur das der Leuchtdichteschwellwert von einem hohen Niveau, nämlich der maximalen Leuchtdichte innerhalb der leuchtenden Fläche, langsam in Richtung der mittleren Leuchtdichte abgesenkt wird.



**Abbildung 3.10:** Einzelne Teilschritte zum Auffinden von hellen und dunklen Regionen innerhalb der leuchtenden Flächen.

Die genannten Verfahren weisen mehrere frei wählbare Parameter wie die minimale Fläche oder die Anzahl der zu berücksichtigenden Effekte auf. Es lässt sich außerdem nicht ohne weiteres festlegen, ab wann ein Gradient störend ist und wie viel dunkler ein dunkler Fleck sein darf, damit er noch nicht als störend empfunden wird. Es wird vermutet, dass es sowohl bei den Gradienten als auch bei den Flecken, eine Abhängigkeit zur Orientierung und zur Lage innerhalb

der leuchtenden Fläche gibt. Andere Einflussfaktoren wie die Umgebungshelligkeit, die Form der leuchtenden Fläche und die Leuchtdichtevertelung innerhalb der leuchtenden Fläche erschweren eine objektivierte, wahrnehmungsbasierte Bewertung der gefundenen Effekte zusätzlich. Gerade bei der Gradientenbewertung ist außerdem die Abhängigkeit zur Messauflösung der Leuchtdichtekamera nicht außer Acht zu lassen, da die Größe des Gradienten mit steigender Auflösung ebenfalls zunimmt. Alle genannten Ansätze sind in die Software integriert und die Ergebnisse sind in Abbildung 5.14 auf Seite 105 dargestellt.

Eine allgemeine Gültigkeit kann aus Sicht des Autors mit den zwei zuletzt genannten Methoden nicht erreicht werden. Für relative Vergleiche eignen sich die Methoden jedoch durchaus. Aus der Literatur sind Methoden zur weiteren Spezialisierung der Modelle bekannt, wie beispielsweise die Hough-Transformation zur Detektion und Überprüfung der Form einer leuchtenden Fläche oder die Gabor-Transformation zur Bewertung der Regelmäßigkeit einer Textur, die für zukünftige Weiterentwicklungen der Software ebenfalls betrachtet werden sollten [Jäh05, Men09].

### 3.3.2 Mehrere Lichtaustrittsflächen

Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erläutert, wird für die Bewertung der Gleichmäßigkeit zwischen unterschiedlichen leuchtenden Flächen die mittlere Leuchtdichte als Maß für die Helligkeit einer einzelnen leuchtenden Fläche verwendet. Die mittlere Leuchtdichte einer Leuchtdichtevertelung berechnet sich wie folgt:

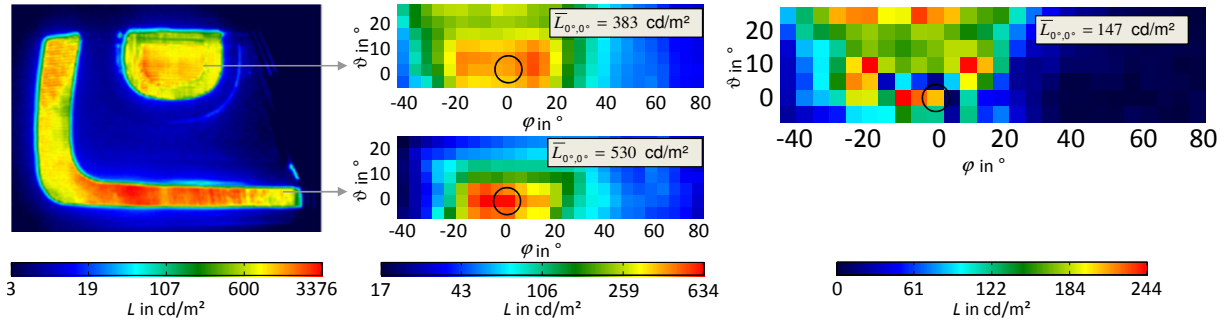
$$\bar{L} = \frac{1}{S_L \cdot Z_L} \sum_{u=0}^{S_L-1} \sum_{v=0}^{Z_L-1} L(u, v). \quad (3.11)$$

Dabei entsprechen  $S_L$  und  $Z_L$  der Anzahl den Spalten und Zeilen der Leuchtdichtevertelung und  $u$  und  $v$  den zugehörigen Spalten- und Zeilenindizes. Unter Berücksichtigung der mit Gleichung (3.1) erzeugten Maskierung  $M$  der Leuchtdichtevertelung auf einzelne leuchtende Flächen, ergibt sich die mittlere Leuchtdichte  $\bar{L}$  für die leuchtende Fläche mit dem Index 1 zu:

$$\bar{L}'_{lf_1} = \frac{\sum_{u=0}^{S_L-1} \sum_{v=0}^{Z_L-1} L(u, v) \cdot M_{lf_1}(u, v)}{\sum_{u=0}^{S_L-1} \sum_{v=0}^{Z_L-1} M_{lf_1}(u, v)}. \quad (3.12)$$

Es werden alle Leuchtdichtewerte, die sich an Positionen befinden, an denen die Maskierung den Wert 1 hat, was in dem Fall dem geometrischen Ort der leuchtenden Fläche entspricht, aufsummiert. Anschließend wird durch die Summe aller Pixel der Maskierung geteilt, was die mittlere Leuchtdichte der leuchtenden Fläche ergibt.

Abbildung 3.11 zeigt das prinzipielle Vorgehen am Beispiel von zwei leuchtenden Flächen einer Signalleuchte für alle definierten Betrachtungsrichtungen. Die Ergebnisvertelung auf der rechten Seite der Abbildung zeigt die absolute Abweichung zwischen den leuchtenden Flächen für alle betrachteten Richtungen. Mit dieser Darstellungsmethode lassen sich die in diesem Fall vorliegenden 182 Ergebnisse einer einzelnen Messung sehr kompakt zusammenfassen und auch gut mit anderen Ergebnissen vergleichen.



**Abbildung 3.11:** Gleichmäßigkeit zwischen unterschiedlichen leuchtenden Flächen. links: exemplarische Leuchtdichteverteilung aus der Betrachtungsrichtung  $\vartheta = 0^\circ$  und  $\varphi = 0^\circ$ ; Mitte: richtungsabhängige Verteilungen der mittleren Leuchtdichten der leuchtenden Flächen 1 und 2, ermittelt aus allen relevanten Leuchtdichteverteilungen; rechts: absolute Abweichung zwischen den zwei Ergebnisverteilungen.

Die absolute Abweichung  $F$  der mittleren Leuchtdichte  $\bar{L}$  zwischen den leuchtenden Flächen 1 und 2 berechnet sich dabei wie folgt:

$$F(lf_1, lf_2) = \left| \bar{L}'_{lf_1} - \bar{L}'_{lf_2} \right|, \quad (3.13)$$

die relative Abweichung  $f$  in Prozent dagegen so:

$$f(lf_1, lf_2) = \frac{\bar{L}'_{lf_1} - \bar{L}'_{lf_2}}{\bar{L}'_{lf_1}} \cdot 100. \quad (3.14)$$

Die Berechnungen sind in die Auswertesoftware integriert. Insofern eine Leuchte mit mehr als zwei leuchtenden Flächen betrachtet wird, kann der Nutzer während der Auswertung festlegen, wie viele und welche der leuchtenden Flächen mit einander verglichen werden. Sollten mehr als zwei Flächen betrachtet werden, wird die maximale Abweichung in der Ergebnisverteilung angezeigt.

### 3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die zwei maßgeblichen Ausprägungen der Gleichmäßigkeit vorgestellt, die sich aus den möglichen Betrachtungsabständen ergeben. Es wird dabei zwischen der Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung innerhalb einer leuchtenden Fläche und der Gleichmäßigkeit der Helligkeit zwischen unterschiedlichen leuchtenden Flächen unterschieden. Bekannte Modelle zur Bewertung der Gleichmäßigkeit werden betrachtet und für die beiden definierten Ausprägungen eine allgemeingültige Berechnungsmethode vorgestellt. Die Bewertung der Gleichmäßigkeit innerhalb der leuchtenden Fläche erfolgt über den Variationskoeffizient, die Bewertung zwischen leuchtenden Flächen über den arithmetischen Mittelwert der Leuchtdichten der einzelnen Flächen. Für beide statistische Methoden ist es unerlässlich, die geometrischen Orte der leuchtenden Flächen innerhalb der Leuchtdichteverteilung präzise bestimmen zu können, da auch nur von diesen die Gleichmäßigkeit bewertet werden soll. Für diesen Zweck wird ein Ansatz eingeführt, welcher über eine Maskierung mit Informationen aus CAD-Daten die leuchtenden Flächen innerhalb der Leuchtdichteverteilung von den übrigen Bildanteilen separieren kann.

Sobald die leuchtenden Flächen innerhalb einer Leuchtdichteverteilung bekannt sind, können nicht nur die Helligkeitsunterschiede zwischen den Flächen, sondern auch deren Abstände zueinander, berechnet werden. Innerhalb des Kapitels wird dafür eine Methode vorgestellt. Außerdem werden zwei Ansätze zum Auffinden spezieller Artefakte innerhalb einer leuchtenden Fläche dargelegt. Die Herausforderungen, die sich aus diesen speziellen Methoden ergeben, werden aufgezeigt.

Die ausgeprägte Richtungscharakteristik aktueller Signalleuchten wird besprochen und eine einfache Darstellung der Bewertungsergebnisse in Form einer zweidimensionalen Verteilung gezeigt und exemplarisch umgesetzt. Die Achsen der Ergebnisverteilung entsprechen dabei den Betrachtungswinkeln, unter denen eine Leuchte gesehen wird. Die Werte der Verteilung entsprechen dem jeweiligen Untersuchungskriterium, wie beispielsweise der minimalen, maximalen oder mittleren Leuchtdichte oder dem Variationskoeffizient aus einer bestimmten Betrachtungsrichtung. Weitere Erläuterungen zu den Ergebnisverteilungen folgen in Abschnitt 5.3 ab Seite 96.





## 4 Lichttechnische Untersuchungen für die softwarebasierte Bewertung

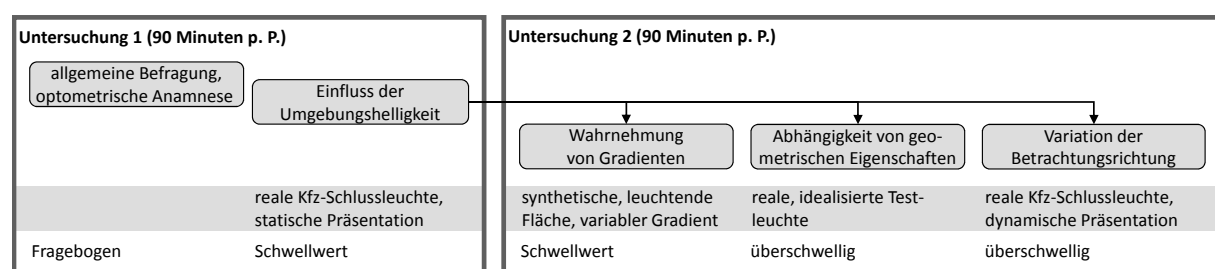
Im Rahmen der Arbeit wird eine psychophysikalische Untersuchung durchgeführt, die im Wesentlichen messtechnische Ziele im Fokus hat. Auf Basis von Probandenaussagen zur Erkennung der Signatur von Signalleuchten und der Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung dieser leuchtenden Flächen sollen objektivierte Kennzahlen zur Beurteilung von Leuchtdichteverteilungen mittels einer Bewertungssoftware berechnet werden.

In Abschnitt 3.2 sind maßgebliche Einflussfaktoren auf die Bewertung der Gleichmäßigkeit identifiziert und näher erläutert worden. Innerhalb der Untersuchungen werden die Umfeldleuchtdichte und die Beobachterposition näher betrachtet. Beide sind auch bei einer typischen Leuchtenabnahmesituation durch Entscheidungsträger stark variierende Größen. Als geometrisches Merkmal wird die Beschaffenheit der funktionalen Optiken der Scheiben innerhalb einer Untersuchung herangezogen und mittels der Probandenaussagen bewertet. Eine weitere Untersuchung dient speziell der Analyse, welche Bewertungsgrößen sich einer Leuchtdichteverteilung entnehmen lassen und sich besonders innerhalb eines Softwarebewertungssystems eignen. Hierbei liegt vor allem eine allgemeine Anwendbarkeit im Blickpunkt.

Die zentrale Fragestellung lautet:

Unter welchen Umfeldbedingungen müssen welche Informationen zu einer Leuchtdichteverteilung bekannt sein, um mit welcher Bewertungsmethode eine Leuchte hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung der leuchtenden Fläche(n) bewerten zu können?

Abbildung 4.1 zeigt die Aufteilung der einzelnen Untersuchungen. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, gliedern sich die Einzeluntersuchungen in gut objektivierbare Schwellwertuntersuchungen und eher subjektive Komfortbetrachtungen. Mit steigendem Grad des Wohlfühlanteils wird die Objektivierung erschwert.



**Abbildung 4.1:** Aufteilung und Einordnung der durchgeführten lichttechnischen Untersuchungen.

Zu Beginn der ersten Untersuchung ist ein allgemeiner Fragebogen mit nachfolgend genannten demografischen Merkmalen auszufüllen und es werden Tests zur Erfassung der optometrischen

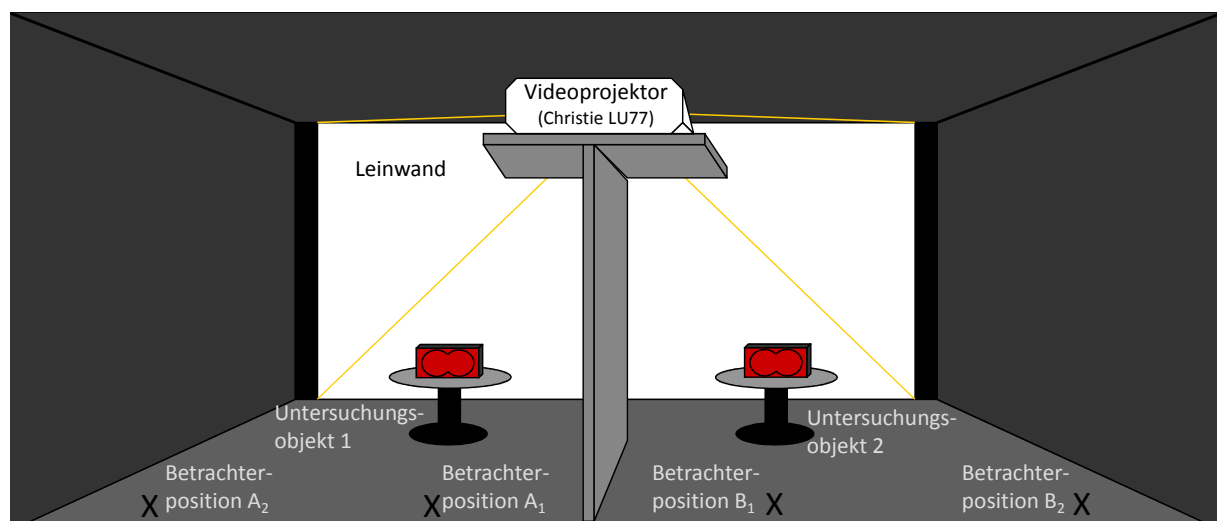
Merkmale durchgeführt, um die prinzipielle visuelle Tauglichkeit des Probanden abzusichern und eine eventuell nötige Gruppierung bei der Auswertung der Versuche zu ermöglichen.

Der allgemeine Teil der Untersuchung besteht aus den nachfolgenden Fragen und optometrischen Tests:

- Alter,
- Geschlecht,
- Führerscheinbesitz,
- Erfahrung im Bereich der Lichtbewertung,
- Sehschärfe,
- Kontrastsehen,
- Stereosehen und
- Farbfehlsichtigkeit.

Zusammengefasst können folgende Aussagen abgeleitet werden: Alle Personen haben eine Sehschärfe oberhalb des für den Führerscheinbesitz geforderten Wertes von  $s = 0,7$  [FeV2009] und besitzen seit mindestens acht Jahren einen Führerschein und ein privates Fahrzeug. Die Hälfte aller Personen nutzt zusätzlich einen Dienstwagen. 85% der Probanden haben keinerlei Erfahrungen im Bereich der Lichtbewertung. Die übrigen Personen haben zwar beruflich teilweise mit Fahrzeugbeleuchtung zu tun, beschäftigen sich aber nicht mit der Bewertung von Scheinwerfern oder Leuchten.

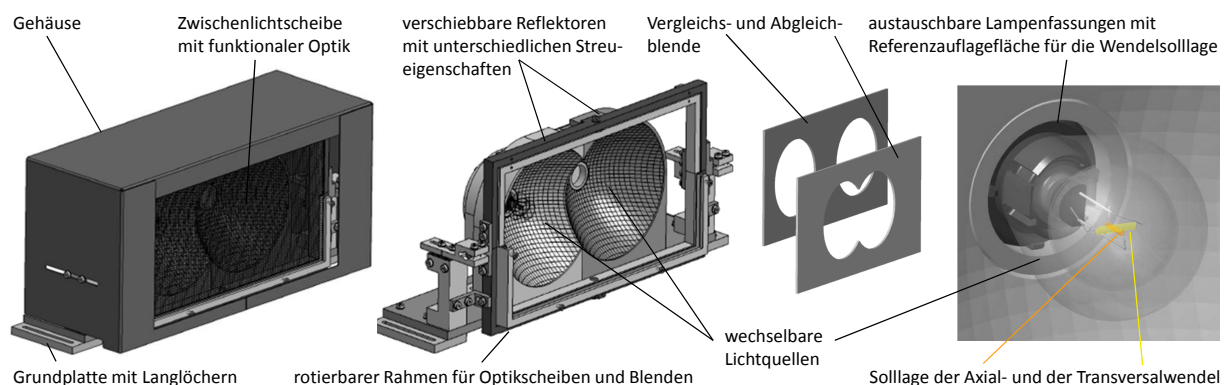
Abbildung 4.2 zeigt den Versuchsaufbau im Lichtkanal. Die Steuerung der Gesichtsfeldbeleuchtung erfolgt mittels eines lichtstarken Videoprojektors der Firma Christie vom Typ LU77 (Auflösung:  $1600 \times 1200$  Pixel (UXGA), Lichtstrom: 7700 lm (ANSI), Farbtemperatur: 6500 K, Gleichmäßigkeit: 90 %, Bauform: 3 LCD) [Chr04]. Innerhalb einer Voruntersuchung wurde die Gleichmäßigkeit der Leinwandausleuchtung maximiert und die Werte für die Helligkeitsstufen festgelegt. Nähere Erläuterungen zur Hintergrundbeleuchtung werden in Abschnitt 4.1 aufgeführt.



**Abbildung 4.2:** Versuchsaufbau mit Videoprojektor zur definierten Regelung der Umfeldleuchtdichte und rotierbaren Untersuchungsobjekten.

Bei den Untersuchungen kommt, neben zwei realen Kfz-Signalleuchten, auch ein Testreflektorsystem zum Einsatz, welches sich durch zahlreiche variable Einstellungen auszeichnet. Das

Testreflektorsystem ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Es liegt in doppelter Ausführung vor und besteht aus jeweils zwei gefrästen Reflektoren, die mit streuenden Segmenten versehen sind und sich auf der Grundplatte in X- und Y-Richtung verschieben lassen. Die Reflektoren unterscheiden sich maßgeblich in ihrer optischen Wirkweise. Während der eine Reflektor mit allen Segmenten die gleiche horizontale und vertikale Streuung erzeugt (Reflektor Nr. 1, 5°-Streuung der Facetten), nimmt bei dem anderen die Streuung in Richtung der Lichtquelle zu (Reflektor Nr. 2, 5°-35°-Streuung der Facetten). Dadurch sollen Abschattungs- (Lichtquellenzuführloch im Reflektor) und Aufhellungseffekte (Glühwendel der Lichtquelle), die sich meist durch eine Abbildung auf der Scheibe zeigen, überdeckt werden.



**Abbildung 4.3:** Testreflektorsystem mit verschiebbaren Reflektoren, die unterschiedliche Streueigenschaften aufweisen, austauschbaren Lichtquellen in verschiedenen Bauformen, rotierbaren Scheiben mit diversen funktionalen Optiken und unterschiedlichen Vorsatzblenden.

Für beide Reflektoren liegen Lampenhalter für unterschiedliche Lichtquellen vor. Sie sind so konstruiert, dass sich die Glühwendeln der Lichtquellen am gleichen geometrischen Ort, dem Brennpunkt der Reflektoren, befinden. Vor den Reflektoren befindet sich ein Rahmen, in den Optikscheiben und Blenden eingesetzt werden können. Dieser kann in zwei Dimensionen rotiert werden. Für den Rahmen stehen eine rot durchgefärbte Scheibe und verschiedene transparente Scheiben mit funktionalen Optiken zur Verfügung, die in unterschiedlichen Kombinationen eingesetzt werden können. Tabelle 4.1 zeigt alle verfügbaren Scheiben und deren Unterscheidung bezüglich Art und Größe der verwendeten Optiken sowie Streuung und Farbe. Außerdem sind zwei lichtundurchlässige Kunststoffblenden verfügbar, die mit und ohne Optikscheibe in den Rahmen eingesetzt werden können.

**Tabelle 4.1:** Übersicht über die Optikscheiben, die für das Testreflektorsystem zur Verfügung stehen.

Scheibe Nr.	Art der Optik		Optikgröße		Streuung		Farbe	
	Walzen	Kissen	5 mm	2 mm	20°	5°	weiß	rot
1	✓		✓		✓		✓	
2	✓		✓			✓	✓	
3	✓			✓	✓		✓	
4	✓			✓		✓	✓	
5		✓	✓		✓		✓	
6		✓	✓			✓	✓	
7								✓

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Untersuchungen detailliert vorgestellt und abschließend eine Zusammenfassung gegeben.

## 4.1 Untersuchungen zur Kontrastempfindlichkeit

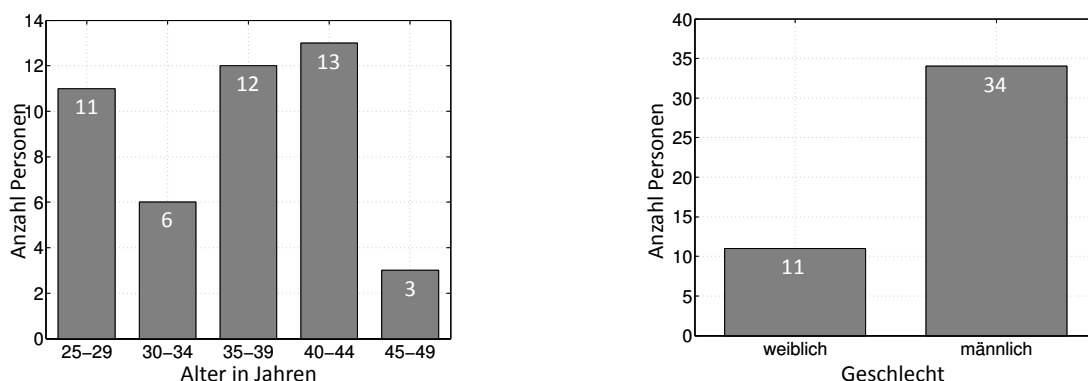
In nachfolgend erläuteter Untersuchung soll die Abhängigkeit der Kontrastempfindlichkeit von der Umgebungsleuchtdichte, also der die Adaptation bestimmenden Leuchtdichte, im realen Bewertungsumfeld betrachtet werden. Dieses wird durch die Einstellsituation, ein Bestandteil im Leuchtenentwicklungsprozess, zum Abgleich der Helligkeit zusammengehöriger leuchtender Flächen einer Lichtfunktion, vorgegeben und beinhaltet folgende Punkte:

- Lichtkanal mit zugehöriger Ausstattung und dem technischen Umfeld,
- Beleuchtung durch künstliches Licht oder abgeschaltete Beleuchtung und
- Beurteilung von Kfz-Schlussleuchten mit typischen Schlusslichtleuchtdichten.

Es wird eine Abhängigkeit der akzeptierten Leuchtdichteunterschiede zwischen zwei Lampen bei Änderung der Beleuchtungssituation erwartet: Je heller das Umfeld ist, desto geringer werden die akzeptierten Leuchtdichteunterschiede. Des Weiteren wird erwartet, dass der Abstand zwischen den leuchtenden Flächen einen Einfluss auf die akzeptierten Leuchtdichteunterschiede hat: Je näher die leuchtenden Flächen liegen, desto kleiner werden die akzeptierten Leuchtdichteunterschiede. Aus den Ergebnissen der Untersuchung soll eine ideale Einstellsituation für die Anpassungen der Leuchtenströme zwischen mehreren leuchtenden Flächen für die verantwortlichen Mitarbeiter abgeleitet werden. Bisher erfolgt die Anpassung in einem vollständig abgedunkelten Raum, was als nicht optimal angesehen wird.

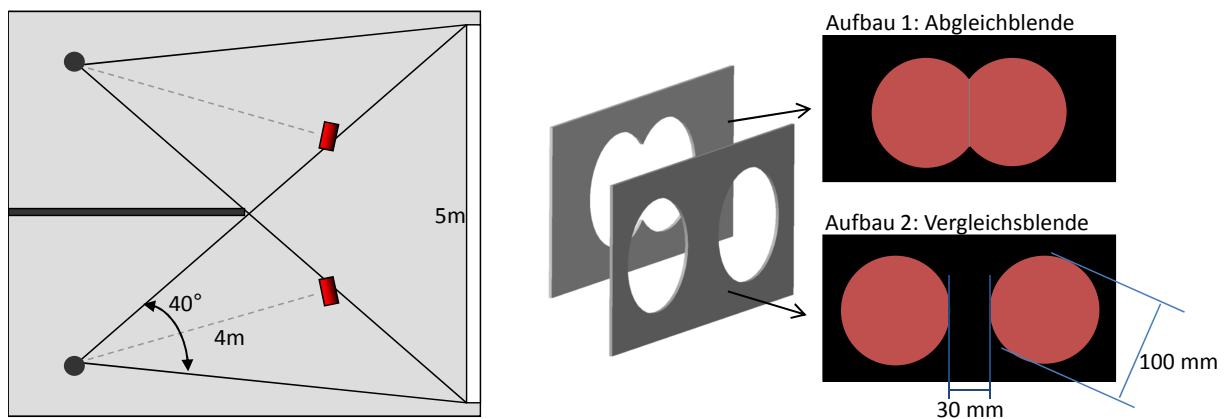
### 4.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Abbildung 4.4 zeigt die Alters- und Geschlechtsstruktur der am Versuch teilnehmenden Probanden.



**Abbildung 4.4:** Stichprobenbeschreibung des ersten Versuchs, aufgeteilt nach Alter und Geschlecht. Es nahmen insgesamt 45 Personen an den Versuchen teil.

Für diese Untersuchung kommt das, im ersten Abschnitt dieses Kapitels vorgestellte, Testreflektorsystem zum Einsatz. Damit keine Bewertung der unterschiedlichen Optikprinzipien, sondern ausschließlich der dargestellten Leuchtdichten erfolgt, werden ausschließlich baugleiche Reflektoren und Lichtquellen eingesetzt. Es soll der Einfluss der Umgebungsleuchtdichte, der Abstand der leuchtenden Flächen zueinander und die Helligkeit der Referenzleuchten auf die Kontrastempfindlichkeit bewertet werden.



**Abbildung 4.5:** Details zum Versuchsaufbau und der Versuchsobjekte, links: Versuchsaufbau mit den Positionen der Probanden und der Versuchsobjekte; rechts: die zwei unterschiedlichen Versuchsobjekte

Es werden zwei im Kfz-Umfeld häufig auftretende Signaturabstände  $b = \{0 \text{ mm}; 30 \text{ mm}\}$  zwischen den leuchtenden Flächen ausgewählt. Zum einen der Aneinanderbau von zwei Reflektorkammern (Aufbau 1: Abgleich), die allerdings zur gleichen Lichtfunktion gehören und zum anderen die Verwendung von zwei Reflektorkammern der gleichen Lichtfunktion, die einen typischen Abstand zueinander aufweisen, wie er beispielsweise zwischen Heckdeckel- und Kotflügelteil einer zweiteiligen Signalleuchte auftreten kann (Aufbau 2: Vergleich). Die zwei Abstände werden über das Verschieben der zwei Reflektoren zueinander und die Verwendung zweier unterschiedlicher Blenden erreicht, die auf der rechten Seite der Abbildung 4.5 dargestellt werden. Die Sehobjektgröße, respektive der Sehwinkel, für eine Leuchte mit einem Durchmesser von  $d_{\text{lf}} = 100 \text{ mm}$  beträgt nach Gleichung (4.1), bei dem vorliegenden Abstand von 4 m ungefähr  $\alpha = 86'$ .

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d_{\text{lf}}}{2 \cdot r}\right) \quad (4.1)$$

Damit ergibt sich laut Abbildung 2.11 auf Seite 31 rechts, eine Schwellenleuchtdichtedifferenz die nahezu unabhängig ist von der Sehobjektgröße. Die Variation der Umfeldleuchtdichte erfolgt über Anpassung des gezeigten weißen Bildes durch den Videoprojektor in den Stufen  $L_u = \{0, 1 \text{ cd/m}^2; 1 \text{ cd/m}^2; 10 \text{ cd/m}^2; 100 \text{ cd/m}^2\}$  in unterschiedlicher Reihenfolge. Dabei stellt der erste Fall eine Bewertungssituation bei abgeschaltetem Projektor dar und der letzte eine bei annähernd maximaler Aussteuerung des Projektors. Die zwei mittleren Bewertungssituationen entsprechen den logarithmischen Zwischenstufen, welche durch Anpassung des dargestellten Projektorbildes erzeugt werden. Laut Abbildung 2.11 links, wird für steigende Umfeldleuchtdichten eine zunehmende relative Kontrastempfindlichkeit erwartet. Aufgrund der Größe der Sehobjekte, sollte die Abhängigkeit jedoch geringer ausfallen als dargestellt.

Es gibt weitere Bewertungssituationen mit höheren Umfeldleuchtdichten, die aber aus Gründen der Praktikabilität und der komplizierten Reproduzierbarkeit, aufgrund der steigenden Anzahl von Einflussgrößen, nicht betrachtet werden. Die nachfolgende Liste zeigt eine Auswahl von Situationen, bei denen am Tag eine Bewertung der Schlussleuchten eines vorausfahrenden Fahrzeugs erfolgen kann:

- Das Schlusslicht ist bei Ausfahrt aus einem Tunnel noch eingeschaltet.

- Die Geschwindigkeit auf Autobahnen ist längere Zeit höher als 140 km/h, wodurch es bei Fahrzeugen mit automatisch geregelter Abblendlicht zur Aktivierung der Beleuchtungseinrichtung kommt [Vol10].
- Der Fahrer fährt tagsüber mit eingeschaltetem Positions- oder Abblendlicht.

Alle genannten Situationen bei eventuell helleren Umfeldleuchtdichten stellen allerdings keinen Regelfall und vor allem keine Gefahr dar. Es sei darauf hingewiesen, dass bei bestimmten hellen Beleuchtungssituationen die Schwarzempfindung soweit herauf gesetzt sein kann, dass dadurch etwas dunkler ausgeleuchtete Bereiche innerhalb einer leuchtenden Fläche überhaupt nicht mehr als leuchtend wahrgenommen werden können [BEGS96].

Die letzte variable Größe ist die mittlere Leuchtdichte der Referenzleuchte selbst. Es werden drei mittlere Leuchtdichten  $\bar{L}_{\text{ref}} = \{200 \text{ cd/m}^2; 400 \text{ cd/m}^2; 1000 \text{ cd/m}^2\}$  dargestellt. Die letzte Angabe entspricht der üblichen mittleren Leuchtdichte eines Kfz-Schlusslichts, welche sich beispielsweise aus den gesetzlichen Anforderungen an die Lichtstärke in Richtung der optischen Achse von ungefähr 10 cd und einer üblichen Fläche einer Schlussleuchte von ungefähr  $0,01 \text{ m}^2$  über Gleichung (1.1) ableiten lässt. Die anderen zwei Vorgaben entsprechen Vorschlägen zur Dimmung von Schlussleuchten bei zulässigen Verkehrssituationen, wie das Warten an einer Ampel oder die Fahrt durch einen dunklen Wald bei Nacht [Koe09, Rip01b].

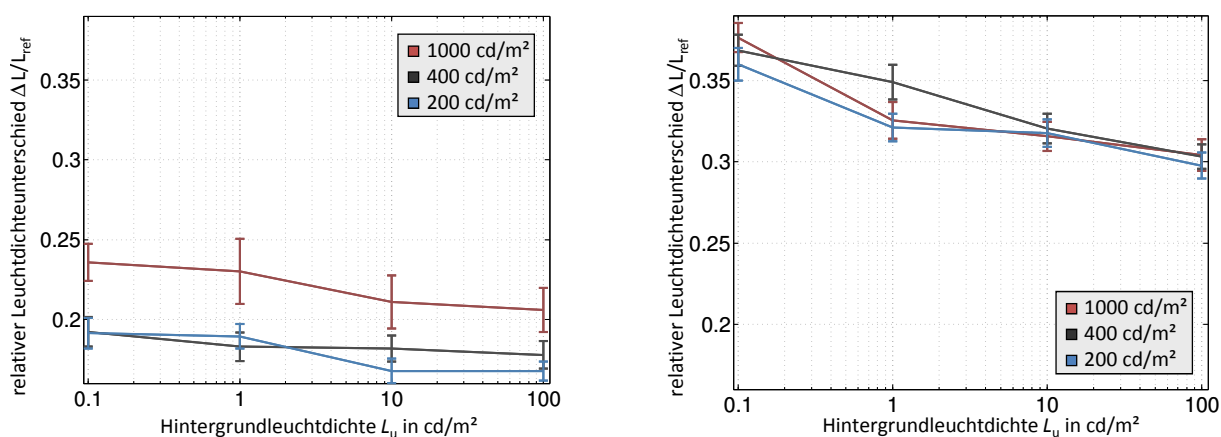
Die Bewertung erfolgt aus einer Entfernung von 4 Metern und einem Blickziel direkt auf die Mitte des Testreflektorsystems. Während der Untersuchung besteht die Aufgabe des Probanden darin, bei den nacheinander präsentierten Kombinationen aus Bauform und mittleren Leuchten- und Umfeldleuchtdichten die regelbare Leuchte von unten an die Referenzleuchte heranzuregeln, bis der wahrgenommene Helligkeitseindruck beider Leuchten identisch ist. Damit erfolgt die Detektion einer Schwellenleuchtdichte. Voruntersuchungen ergaben, dass ein Heranregeln von oben wenig sinnvoll ist, da der definierte Ausgangspunkt ein höherliegendes Leuchtdichtenniveau sein muss und somit Blend- und Adaptationseffekte auftreten, die zu stark abweichenden Ergebnissen führen.

### 4.1.2 Untersuchungsergebnisse

Als allgemeine Ergebnisse lassen sich die folgenden Aussagen treffen: Je heller das Bewertungsumfeld, respektive die Hintergrundleuchtdichte, eingestellt ist, desto kleiner ist die Leuchtdichtedifferenz zwischen Referenz- und Regelleuchte. Die Differenz ist außerdem bei aneinanderggebauten Leuchten kleiner als bei getrennten. Abbildung 4.6 zeigt die relative Abweichung der Leuchtdichte zwischen Regel- und Referenzleuchte  $\Delta L$  zur Referenzleuchtenleuchtdichte  $L_{\text{ref}}$ , bei den vier gegebenen Umfeldleuchtdichten  $L_u$ . Innerhalb der einfachlogarithmischen Darstellung ist eine Linearität des Verlaufs zu erkennen (Weber-Fechnersches Gesetz). Außerdem ist die zu erwartende Konstanz für den relativen Leuchtdichteunterschied abzulesen.

Mit steigender Referenzleuchtenleuchtdichte steigt somit in gleicher Weise der Leuchtdichteunterschied (Webersches Gesetz). Das heißt, der Beobachter wird unempfindlicher auf Leuchtdichteunterschiede. Einzig der Verlauf der relativen Leuchtdichtedifferenz der hellsten Leuchtenleuchtdichte von  $\bar{L}_{\text{ref}} = 1000 \text{ cd/m}^2$  im aneinanderggebauten Zustand weicht auffällig von den Erwartungen ab. Die großen Abweichungen werden auf die starke Abhängigkeit der Kontrastempfindlichkeit von der Adaptationsleuchtdichte zurückgeführt. Nach Abbildung 2.7 auf Seite 28 können Objektleuchtdichten dann besonders gut differenziert werden, wenn sie sich

nahe der Adaptationsleuchtdichten bewegen. Bei der hellsten Leuchtenleuchtdichte liegt der Reiz außerhalb des Weber-Fechner-Gebietes. Die daraus resultierende Unempfindlichkeit führt zu einer höheren Schwelle. Für den Vergleichsversuch mit den getrennten Leuchten tritt dieser Effekt nicht ein. Der Einfluss der Separierung der Leuchten erweist sich als größer, als der der Adaptation.



**Abbildung 4.6:** Akzeptierte relative Leuchtdichteunterschiede  $\Delta L/L_{ref}$  für die drei Referenzleuchtdichten  $L_{ref}$  bei vier Umfeldleuchtdichten  $L_u$ , links: Ergebnisse für die aneinanderggebauten Leuchten; rechts: Ergebnisse für die mit dem 30 mm-Spalt getrennten Leuchten. Zusätzlich ist der Standardfehler der jeweiligen Mittelwerte dargestellt. Die Einzelergebnisse sind in Anhang B.3 auf Seite 137 aufgeführt.

Die Untersuchung hat als Ergebnis, dass Leuchten bei möglichst hellem, gleichmäßigem Umfeld betrachtet werden müssen, wenn eine kritische Aussage zur Gleichmäßigkeit, wie sie im Leuchtenentwicklungsprozess vorliegt, getroffen werden soll. Es ist davon auszugehen, dass selbst bei einer Einstellsituation bei blendfreiem Tageslicht bessere Ergebnisse erzielt werden als bei dunkler Umgebung. Dies gilt sowohl für die Betrachtung der Gleichmäßigkeit zwischen mehreren Leuchten als auch innerhalb einer leuchtenden Fläche.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Untersuchungen der zweiten Terminserie erläutert. Diese nutzen die obigen Erkenntnisse und werden mit der hellsten Umfeldleuchtdichte  $L_u = 100 \text{ cd/m}^2$  durchgeführt.

## 4.2 Untersuchungen zur Gradientenabhängigkeit

In der ersten Untersuchung werden anhand eines sehr einfachen Testaufbaus mit einer synthetisierten Leuchte Zusammenhänge zwischen statistischen Größen der Bildverarbeitung, wie dem arithmetischen Mittelwert oder der Standardabweichung, und der Bewertung der gezeigten Szenarien durch Probanden hergestellt sowie relevante Größen für eine Kennzahl zur Bewertung der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten ermittelt. Dabei werden die Überlegungen aus Abschnitt 3.3 berücksichtigt und nur noch als geeignet ausgewählte Größen betrachtet. Die zweite Untersuchung dient der Anwendung der bisherigen Erkenntnisse auf ein weniger idealisiertes Untersuchungsobjekt. Dafür kommt wieder das Testreflektorsystem zum Einsatz, diesmal jedoch mit den unterschiedlichsten Aufbauten. In der letzten Untersuchung erfolgt eine Bewertung der Gleichmäßigkeit an zwei realen Kfz-Signalleuchten, die dazu auch noch dynamisch,

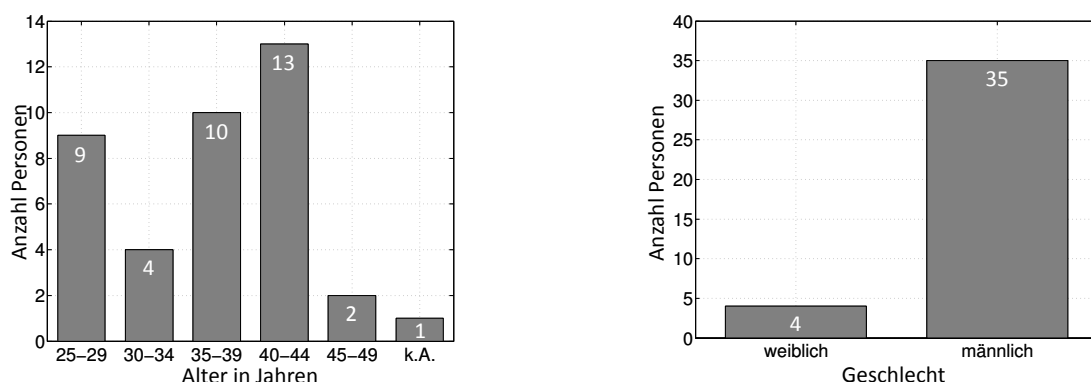


also in Bewegung, präsentiert werden. Damit soll die Abhängigkeit der Bewertung von der Betrachtungsrichtung untersucht werden.

Für das im Rahmen der Arbeit entwickelte Messsystem werden einfache, allgemein anwendbare Modelle gesucht, welche die Zusammenhänge zwischen der Bewertung von Signalleuchten durch Probanden und durch einen Softwarealgorithmus abbilden können. Durch das einfache Modell soll eine aussagekräftige Beurteilung auch von zukünftigen Leuchten ermöglicht werden. Der im Folgenden erläuterte Versuch stellt dafür die Grundlage dar. An einem sehr einfachen Aufbau werden empirische Untersuchungen mit einer Vielzahl von Probanden durchgeführt und alle relevanten Größen vermerkt. Anschließend erfolgt eine Vermessung der gezeigten Szenarien und im Anschluss eine Auswertung der gemessenen Daten. Dadurch soll es möglich sein, eine erste Vorhersage zur Aussagekraft von einfachen, zumeist bereits innerhalb der Leuchtdichtekamerasoftware (LMK2000 und LMK LabSoft der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH [PKP07, PKPK10]) zur Verfügung stehenden Bildoperatoren zur statistischen Auswertung der Gleichmäßigkeit zu treffen.

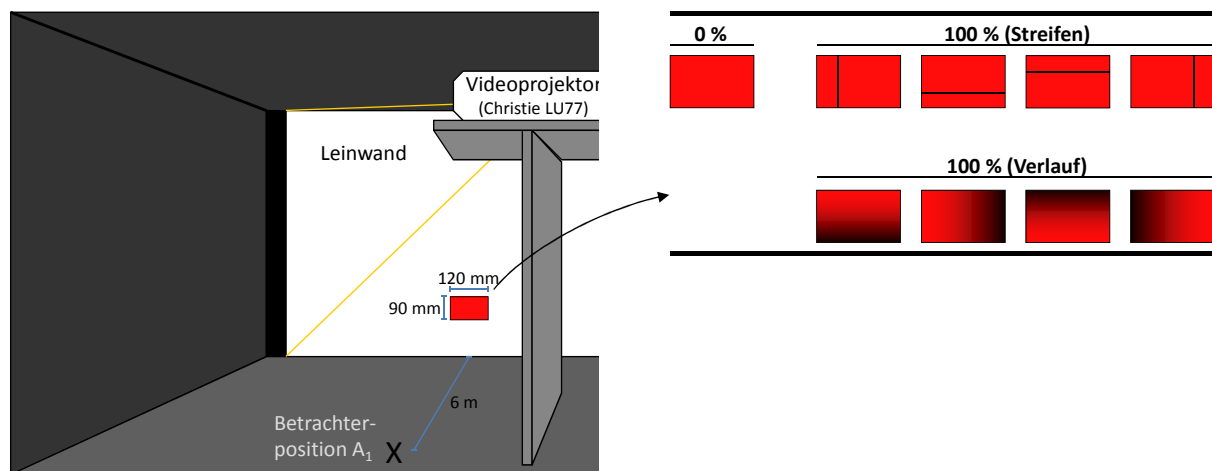
#### 4.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

An den nachfolgenden Versuchen (Abschnitt 4.2 bis 4.4) beteiligen sich insgesamt 39 Probanden, mit der in Abbildung 4.7 gezeigten Alters- und Geschlechtsaufteilung. Die Probanden sind in zwei Gruppen eingeteilt, die zwar die gleichen Aufgaben erfüllen müssen, diese aber in unterschiedlicher zeitlicher Abfolge präsentiert bekommen, um eventuell auftretende Reihenfolgeeffekte innerhalb der Versuche zu vermeiden. Die Auswertung der Versuche ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei Gruppen, weswegen im weiteren Verlauf der Arbeit auf die separate Betrachtung der Gruppen verzichtet wird.



**Abbildung 4.7:** Alters- und Geschlechtsstruktur der Probanden der zweiten Versuchsreihe, an der insgesamt 39 Personen teilnahmen.

Der Versuchsaufbau entspricht dem in Abbildung 4.2 gezeigten, allerdings ohne die dargestellten Versuchsobjekte. Die Probanden sitzen an Betrachterposition A1 und schauen auf die weiß beleuchtete Leinwand. Zentral im Blickfeld wird ein rotes, gleichmäßig ausgeleuchtetes Rechteck (120 mm × 90 mm) mit einer typischen Fläche einer Signalleuchte von ungefähr 0,01 m<sup>2</sup> eingeblendet. Mithilfe einer Computertastatur kann der Proband innerhalb des roten Rechtecks eines der in Abbildung 4.8 dargestellten Muster schrittweise einblenden. Es werden keine zeitlichen Vorgaben gesetzt, wie lange ein Bild betrachtet oder wie schnell ein Ergebnis erreicht werden soll.



**Abbildung 4.8:** links: Angepasster Versuchsaufbau nach Abbildung 4.2, mit eingblendetem rotem Rechteck als Versuchsobjekt. Es stellt den Ausgangspunkt der Untersuchung dar; rechts: Die acht zufällig eingblendeten Muster, bestehend aus horizontalen und vertikalen Streifen und Verläufen, in maximaler Kontrasteinstellung.

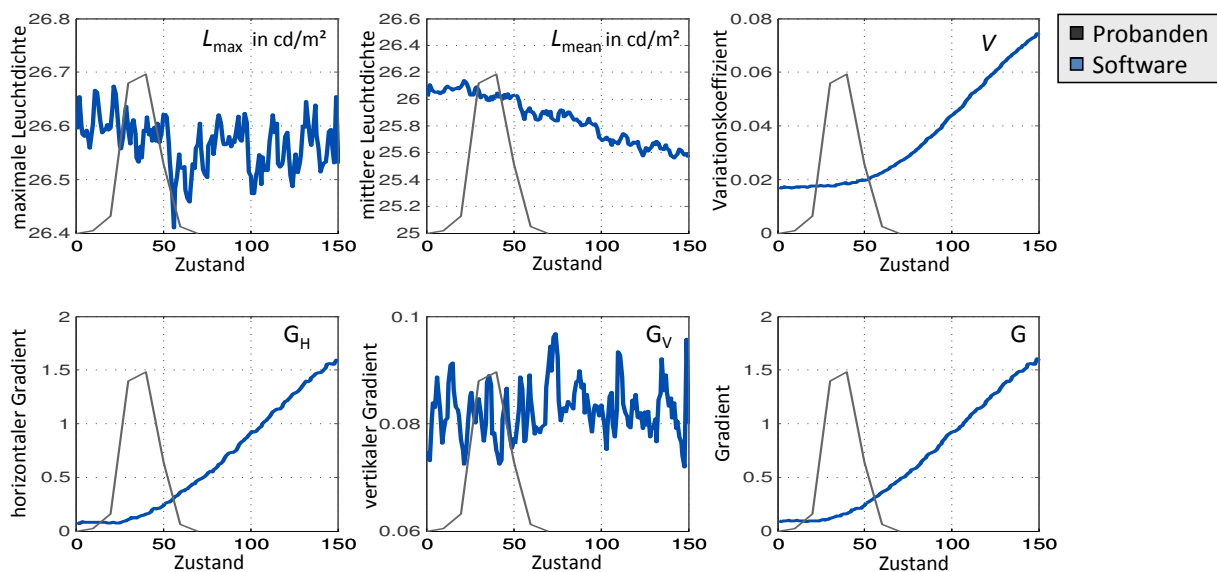
Die Auswahl des Musters erfolgt dabei für die Probanden vollständig zufällig. Zwischen Minimum (0%) und Maximum (100%) liegen insgesamt 150 Stufen, also 151 Zustände, vor. Sobald eines der Muster und die Position erkannt wird, wird die Eingabe beendet und der zugehörige Zustandswert vermerkt. Im Anschluss an die Untersuchung werden von allen acht Mustern Leuchtdichteaufnahmen der 151 Zustände gemessen. Diese sind dann für die Auswertung verfügbar. Das Aufnehmen und Speichern der insgesamt 1208 Leuchtdichteverteilungen erfolgt automatisiert mithilfe eines *MATLAB*-Skriptes.

## 4.2.2 Untersuchungsergebnisse

Wie bereits im letzten Abschnitt erläutert, dient diese Untersuchung vornehmlich der Prüfung relevanter statistischer Größen in der Auswertung von Leuchtdichteverteilungen. Es wird sich hierbei auf die in Kapitel 3.3 auf Seite 54 genannten Größen bezogen. Eine vorgeschaltete Glättung der Ausgangsverteilungen nach der in Abschnitt 2.6.1 auf Seite 39 beschriebenen Methode ist nötig, weil dadurch Schwankungen zwischen benachbarten Pixeln unterdrückt werden können, die durch das Bildrauschen der Leuchtdichtekamera oder das Zeilensprungverfahren des Videoprojektors auftreten.

### Auswertung des Streifenversuchs

In Abbildung 4.9 sind exemplarisch für einen vertikalen Streifen alle Zustände in den als relevant erachteten Bildverarbeitungsverfahren dargestellt. Den Diagrammen kann entnommen werden, dass das vertikale Streifenmuster, mittels eines horizontalen Gradientenoperators, wie er in Abschnitt 2.6.2 auf Seite 40 erläutert wird, sehr gut detektiert werden kann. Der Anstieg der Kurve fällt bei Verwendung eines richtungsunabhängigen Gradienten nur unbedeutend ab, weswegen dieser Gradientenmethode der Vorzug gegeben werden sollte. Dadurch wird die allgemeine Anwendbarkeit gesteigert und diagonal orientierte Streifen können sicherer gefunden werden.



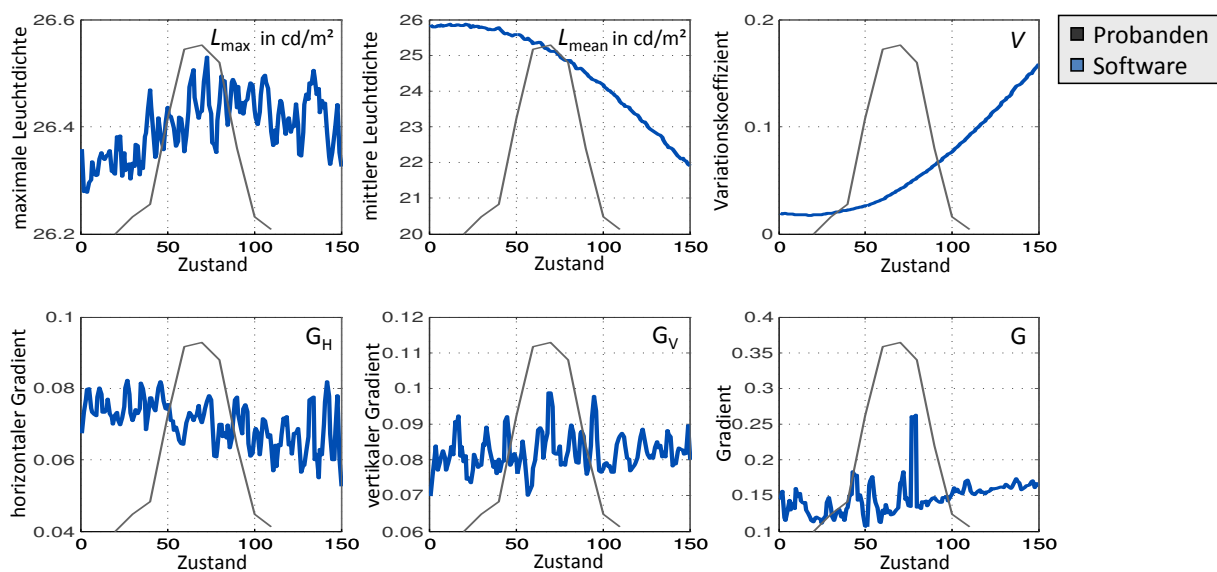
**Abbildung 4.9:** Auswertung der Streifenmusterbewertung hinsichtlich der als relevant ausgewählten statistischen Größen und gradientenbasierten Verfahren, jeweils für alle 151 Zustände eines ausgewählten vertikalen Streifens. Zusätzlich ist in jedem Diagramm die Verteilung der zugehörigen Probandenbewertungen für diesen Streifen dargestellt. Die Einzelergebnisse sind in Anhang B.4 auf Seite 138 aufgeführt.

### Auswertung des Verlaufsversuches

Die Ergebnisse der Verlaufsbewertung sind in Abbildung 4.10 am Beispiel eines vertikalen Verlaufs (oben rot, unten schwarz) dargestellt. Wenn eine gewisse gleichmäßige Ausleuchtung innerhalb der Flächen gegeben ist, eignet sich der Variationskoeffizient als Prädiktor für eine Abnahme der Gleichmäßigkeit. Dieser wechselt genau am Mittelwert der Probandenbewertung in den linearen Anstieg und ist damit tauglich, die vorliegende Ungleichmäßigkeit zu detektieren.

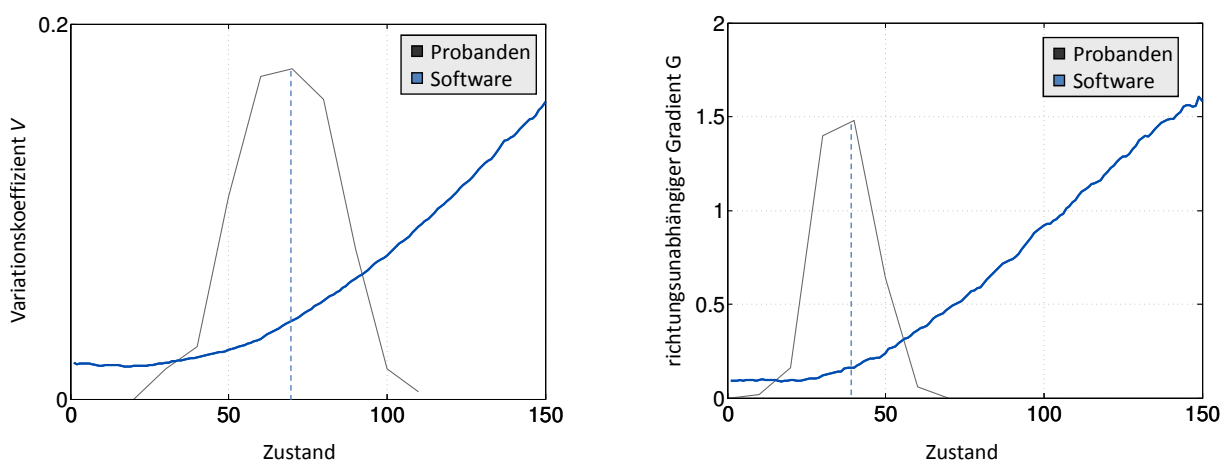
Von besonders hoher Relevanz für eine computergestützte Auswertung ist, dass die leuchtende Fläche definiert sein muss. Dies erklärt sich schnell an der mittleren Leuchtdichte und auch der Gradientenberechnung. Da eine leuchtende Fläche im Normalfall heller ist als ihre Umgebung, wird die mittlere Leuchtdichte mit Vergrößerung des gewählten Bildausschnittes immer kleiner. Damit verliert die mittlere Leuchtdichte als Indikator für die Helligkeit einer leuchtenden Fläche an Aussagekraft. Ein ähnliches Problem ergibt sich bei der Betrachtung von Gradienten. Wenn innerhalb einer Leuchtdichteverteilung eine Gradientenbewertung vorgenommen wird, ist aufgrund der Abgrenzung der leuchtenden Fläche zu ihrer Umgebung genau an der Umrandung der steilste Gradient zu erwarten. Dies stellt aber einen Gradienten dar, der bezüglich der Gleichmäßigkeitsbewertung überhaupt keine Relevanz hat. Bei einer Gradientenbewertung ist deshalb darauf zu achten, nur Gradienten innerhalb der zu bewertenden leuchtenden Fläche zu betrachten. Weitere Details dazu können Abschnitt 3.2.3 ab Seite 52 entnommen werden.

In Abbildung 4.11 sind die zwei als geeignet ausgewählten Verfahren zur Erkennung und Bewertung des Streifens und des Helligkeitsverlaufes zusammengefasst. Als allgemeine Ergebnisse lassen sich noch folgende bekannte Erkenntnisse innerhalb des Versuchs bestätigen. Die zu den Aussagen gehörende Statistik ist in Anhang B.4 ab Seite 138 zu finden. Ein Streifen, also eine Inhomogenität innerhalb einer gleichmäßig leuchtenden Fläche wird eher erkannt und so-



**Abbildung 4.10:** Auswertung der Bewertung des Verlaufes hinsichtlich der als relevant ausgewählten statistischen Größen und gradientenbasierten Verfahren, jeweils für alle 151 Zustände eines ausgewählten Verlaufes. Zusätzlich ist in jedem Diagramm die Verteilung der zugehörigen Probandenbewertungen dargestellt. Die Einzelergebnisse sind in Anhang B.4 auf Seite 138 aufgeführt.

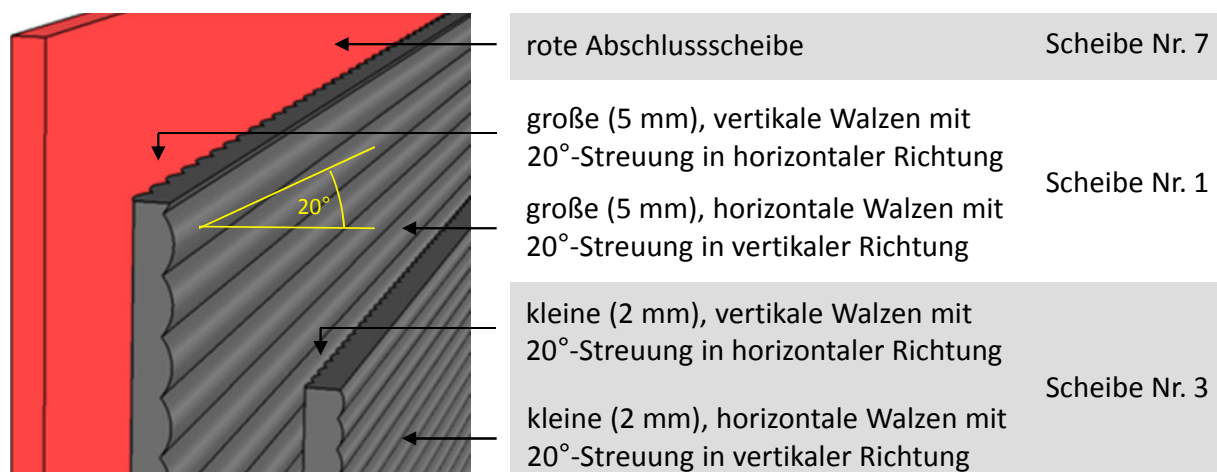
mit bei gleicher Helligkeit als störender empfunden als eine dunkle Fläche mit einem weichen Verlauf zur Umgebung. Für einen Streifen hat die Orientierung innerhalb eines Rechtecks mit unterschiedlicher Kantenlänge keinen Einfluss. Für den Verlauf ergibt sich eine Abhängigkeit, die vermutlich auf das Seitenverhältnis des Rechtecks zurückzuführen ist. Ein Verlauf entlang der kürzeren Seitenlänge des Rechtecks wird wesentlich schneller erkannt. Ein Verlauf lässt sich wesentlich uneindeutiger innerhalb einer leuchtenden Fläche detektieren, da keine definierte oder zumindest keine gleichmäßig umlaufende Kante gleicher Helligkeit oder gleichen Gradientens existiert.



**Abbildung 4.11:** Zusammengefasste Ergebnisse für die ausgewählten Kriterien, links: Variationskoeffizient für die Verlaufsbewertung; rechts: richtungsunabhängiger Gradientenbewertung.

### 4.3 Beurteilung verschiedener Optikkonzepte

Eine Auslegungsphilosophie für Kfz-Signalleuchten sieht vor, dass aus Bauraumgründen nur Reflektoren mit geringer Streuung der einzelnen Segmente verbaut werden und die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen fast ausschließlich über streuende Elemente auf der Scheibe erfolgt. Die dafür nötigen Optiken, die in vertikaler und horizontaler Richtung streuen müssen, lassen sich im Wesentlichen über zwei Arten bereitstellen: Einseitig über sogenannte kissenförmige Optiken oder zweiseitig über horizontale und vertikale Walzenoptiken. Aufgrund der Orientierung in nur eine einzelne Richtung, bieten die Walzen dem Designer mehr Gestaltungsspielraum. Außerdem weisen die Walzen aufgrund ihrer einfacheren Geometrien eine höhere Fertigungsgenauigkeit auf, weswegen die Scheiben mit Walzen bei dieser Untersuchung im Vordergrund stehen. Als variable Größen existieren im Wesentlichen der Streuwinkel, also der Radius der Walzen, und deren Abmessungen. Beide Größen stehen im Spannungsfeld zwischen gesetzlichen und ästhetischen Anforderungen. Erkenntnisse aus der Optikauslegung sind, dass beide Variablen möglichst groß gewählt werden sollten. Bei der ersten Größe widerspricht aber meist der Gesetzgeber, denn wenn zu weit nach außen gestreut wird, ist meist zu wenig Licht in Hauptwirkrichtung zur Verfügung. Die zweite Größe liegt im Einflussbereich der Designer, die der Erfahrung nach eher filigrane Geometrien bevorzugen.



**Abbildung 4.12:** Beschreibung der funktionalen Optiken der verwendeten Scheiben.

In dieser Untersuchung werden Scheiben mit unterschiedlichen funktionalen Optiken hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für eine gleichmäßige Ausleuchtung der leuchtenden Fläche überprüft. Außerdem wird betrachtet, ob eine Änderung der Betrachterposition die Bewertung der Gleichmäßigkeit beeinträchtigen.

#### 4.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau entspricht dem in Abbildung 4.2 auf Seite 64 gezeigten. Es erfolgt eine Bewertung von insgesamt sechs Reflektor-Scheiben-Kombinationen aus zwei unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen (Position 1: frontal, Position 2: 20° seitlich). Abbildung 4.12 zeigt die verwendeten Scheiben für die Untersuchung. Die Scheiben entsprechen den Nummern 1, 3 und 7 aus der Übersicht in Tabelle 4.1. Des Weiteren wurden die zwei unterschiedlichen Arten von Reflektoren verbaut, um unterschiedliche Anmutungen zu erhalten. Die Aufteilung der

Probanden entspricht dem vorangegangenen Versuch. Der Ablauf gestaltet sich derart, dass die zu bewertenden Kombinationen nacheinander präsentiert werden und der Proband jeweils eine Bewertung auf einer 12-stufigen Skala vornehmen muss, die in Abbildung 4.13 gezeigt ist. Für besondere Auffälligkeiten steht jeweils eine Skizze der Leuchte und ein Textfeld für Anmerkungen zur Verfügung.

**Sie sehen eine zweiteilige Leuchte. Ist der rechte Teil Ihrer Meinung nach gleichmäßig ausgeleuchtet?**

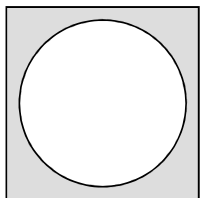
↓ ja, voll und ganz						nein, überhaupt nicht ↓					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Anmerkungen:

---



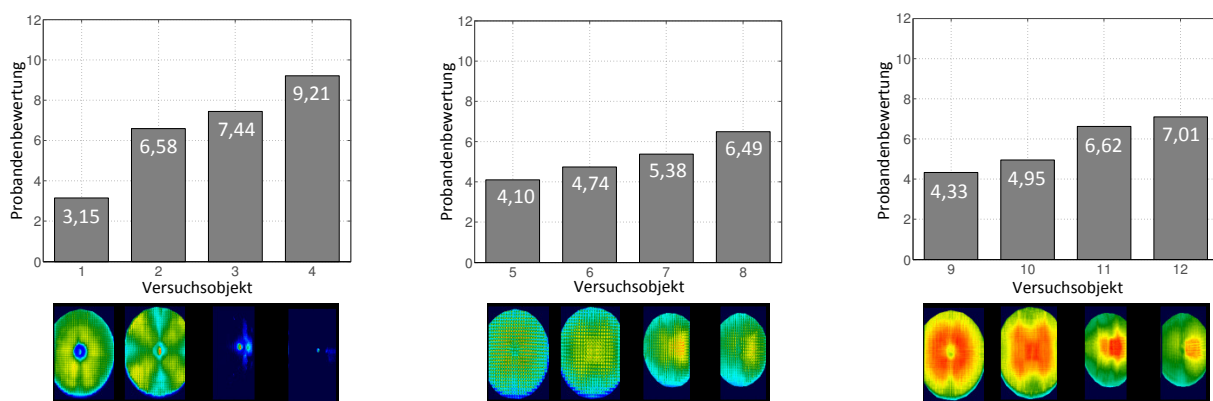
---



**Abbildung 4.13:** Auszug aus dem Fragebogen mit der 12-stufigen Bewertungsskala.

### 4.3.2 Untersuchungsergebnisse

Die statistische Auswertung dieser Versuchsreihe ergibt einen eindeutigen Trend, welche Optiken sich besonders gut für eine gleichmäßige Ausleuchtung speziell auch aus seitlichen Betrachtungswinkeln eignen. Abbildung 4.14 in Tabelle 4.2 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen verwendeten Optiken. Die zur Auswertung gehörige Statistik ist in Anhang B.5 ab Seite 140 zu finden.



**Abbildung 4.14:** Bewertungen der untersuchten Optikkonzepte und zugehörige Leuchtdichteaufnahmen aus der jeweiligen Betrachtungsrichtung.

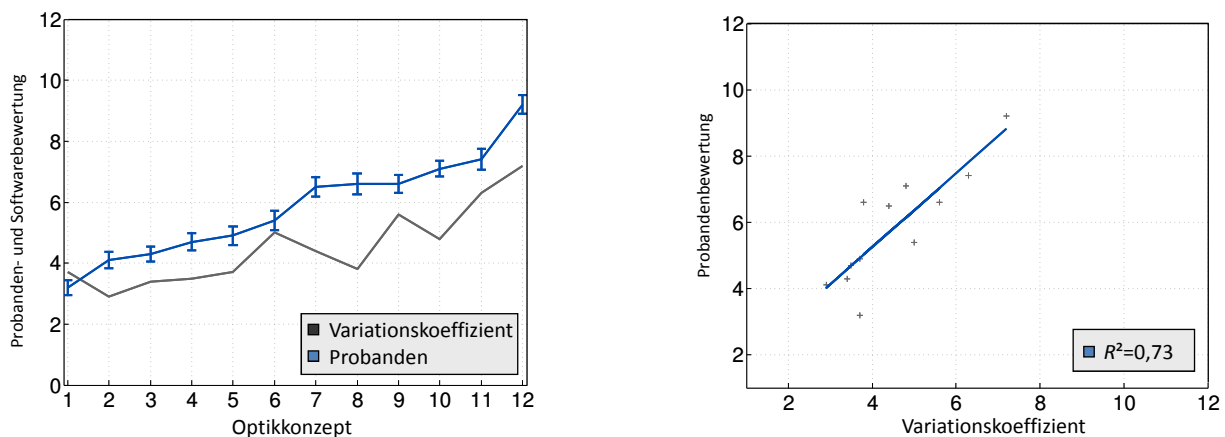
Für alle drei Optikkonzepte ist zu erkennen, dass jeweils die frontale Ansicht als gleichmäßiger ausgeleuchtet bewertet wird als die seitliche Ansicht. Es ist außerdem daraus abzuleiten,

**Tabelle 4.2:** Verteilung der Bewertungen der einzelnen Versuche zu den untersuchten Optikkonzepten.

Scheibe	rot (Nr. 7)				rot (Nr. 7), groß (Nr. 1)				rot (Nr. 7), fein (Nr. 3)			
Reflektortyp	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
Betrachterposition	frontal	frontal	seitlich	seitlich	frontal	frontal	seitlich	seitlich	frontal	frontal	seitlich	seitlich
Bewertung	3,15	6,58	7,44	9,21	4,10	4,74	5,38	6,49	4,33	4,95	6,62	7,01
Versuchsobjekt	1	8	11	12	2	4	6	7	3	5	9	10

dass bei Verwendung einer optiklosen Scheibe, der dramatischste Abfall in der durchschnittlichen Bewertung zwischen frontaler und seitlicher Ansicht zu verzeichnen ist. Es ist ebenfalls zu sehen, dass ohne Optikscheiben, Effekte welche durch die Streueigenschaften des Reflektors auftreten, leider nicht mehr kaschiert werden können, was die schlechte Bewertung der Frontalansicht eines der Reflektoren (Versuchsobjekt 2) zeigt. Scheibe Nr. 1 mit den großen Walzenoptiken zeigt ein durchgängig hohes Niveau der Bewertung und außerdem den geringsten Abfall zwischen frontaler und seitlicher Ansicht und stellt damit hinsichtlich der Gleichmäßigkeit die beste Lösung der hier getesteten Varianten dar. Scheibe Nr. 3 mit den kleinen Walzenoptiken stellt einen Kompromiss bezüglich der gestalterischen Anforderungen dar. Die Größe der Optiken wird möglichst gering gehalten, der Erfüllung der seitlichen Lichtstärkeanforderungen und der Erzeugung einer gleichmäßigen Ausleuchtung wird über die Scheibe Rechnung getragen.

Abbildung 4.15 zeigt eine Zusammenfassung der Einzelergebnisse der unterschiedlichen Optikkonzepte und ein Diagramm, welches den Zusammenhang ( $R^2 = 0,73$ ) zwischen den Probandenbewertungen und der Bewertung nach dem als relevant ermittelten Variationskoeffizienten zeigt.



**Abbildung 4.15:** Zusammengefasste Ergebnisse der Untersuchung zu den Optikkonzepten und Vergleich zur Softwarebewertung mittels Variationskoeffizient. Zusätzlich ist der Standardfehler der jeweiligen Mittelwerte dargestellt. Die Einzelergebnisse sind in Anhang B.5 auf Seite 140 aufgeführt.

Zwei interessante Zusatzergebnisse seien hier zum Abschluss noch genannt. Bei Verwendung einer Scheibe mit Optiken und dem Reflektor Nr. 2 mit zunehmender Streuung in Richtung Lichtquelle wird die Lichtquelle weit weniger gut kaschiert, als es in der Theorie erwartet wird. Bemerkenswert ist außerdem, dass fast keiner der Probanden bei der Untersuchung ohne Optikscheiben die Direkteinsicht auf die Glühwendel der Lichtquelle angemerkt, geschweige denn negativ bewertet hat. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Direkteinsicht auf die Lichtquelle, insofern die Lichtquelle einwandfrei als Lichtquelle erkannt werden kann, keine Aus-



wirkungen auf die Beurteilung der Gleichmäßigkeit hat. Erfolgt jedoch eine eckige Abbildung der Lichtquelle auf der Scheibe, wie es bei Transversalwendeln passieren kann, wirkt der helle Fleck nicht mehr wie eine Direkteinsicht und wird daher als Mangel bewertet.

## 4.4 Erkennung der Signatur aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen

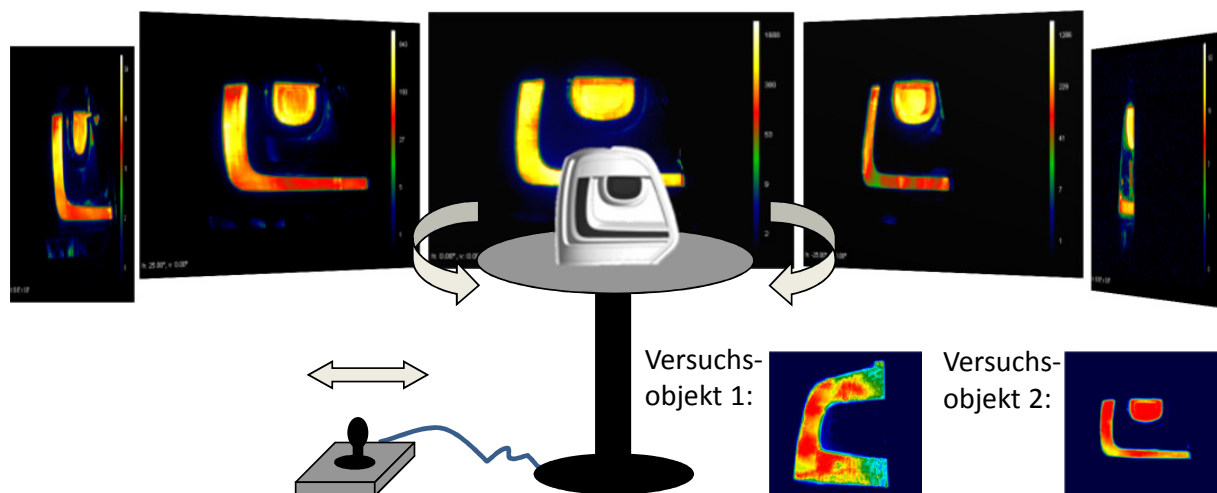
Die letzte Untersuchung löst sich von den idealisierten Aufbauten der zuvor erläuterten Versuche. Es werden zwei reale Kfz-Signalleuchten bewertet. Des Weiteren wird die Betrachtungsrichtung als großer Einflussfaktor untersucht. Um für alle Probanden die gleichen Betrachtungsrichtungen auswerten zu können, wird innerhalb der Untersuchung nur der horizontale Betrachtungswinkel variiert. Durch die Drehbewegung wird ein weiterer Freiheitsgrad in die Versuche integriert, wodurch eine weitere Annäherung an die reale Bewertungssituation erfolgt. Außerdem haben bereits Untersuchungen in der Homogenitätsbewertung von Scheinwerferverteilungen gezeigt, dass Inhomogenitäten, also Störstellen in der Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Straße, in der Bewegung realistischer wahrgenommen werden können [Dah01]. Die Straßendeckschicht ändert sich während der Fahrt permanent. Die durch den Scheinwerfer erzeugten Inhomogenitäten befinden sich auf der Straße jedoch die ganze Zeit annähernd am gleichen Ort, wodurch sie sehr auffällig werden. Bei Signalleuchten ist dieser Effekt ähnlich und ebenfalls geometrisch begründbar. Innerhalb einer Drehbewegung einer zu beobachtenden Leuchte, sind Inhomogenitäten (beispielsweise der Hotspot einer Wendelabbildung auf der Optikscheibe oder Moiré-Effekte durch die Überlagerungen der Scheibenoptiken mit den Optiken der Reflektorsegmente) deshalb auffällig, weil sie ihren geometrischen Ort anders ändern, als es die Leuchtengeometrie vermuten lässt.

Innerhalb der Auswertung steht wieder die allgemeine Bewertung der Gleichmäßigkeit im Mittelpunkt. Zusätzlich wird ein angepasstes Bewertungsmodell getestet, siehe dazu auch Kapitel 3.3.1 ab Seite 56.

### 4.4.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Für diese Untersuchung wird der übliche Aufbau um eine Dreheinheit und einen Joystick erweitert, mit dem der Proband in der Lage ist, das jeweilige Versuchsobjekt in horizontaler Richtung zu bewegen und damit sowohl die geometrische als auch die photometrische Anmutung der Leuchte zu beeinflussen, siehe Abbildung 4.16. Der Verlauf der Untersuchung stellt sich dabei wie folgt dar. Der Proband betrachtet die Leuchte aus der Bezugsachse und hat die Zeit, den wahrgenommenen Gleichmäßigkeitseindruck zu verinnerlichen. Sobald er bereit ist, wird die Leuchte in vorgegebener horizontaler Richtung gedreht, bis eine auffällige Änderung der photometrischen Erscheinung, also des Helligkeitseindrucks, erfolgt. Anschließend wird die Leuchte in die Ausgangsposition zurückgefahren und die Prozedur wird in die andere horizontale Richtung wiederholt. Zu jedem Bewertungszeitpunkt hat der Proband die Möglichkeit, die sich für die Entscheidung verantwortlich zeichnende Auffälligkeit in einer Skizze zu vermerken und eine Bemerkung aufzuschreiben. Der eingestellte Winkel wird ebenfalls vermerkt.

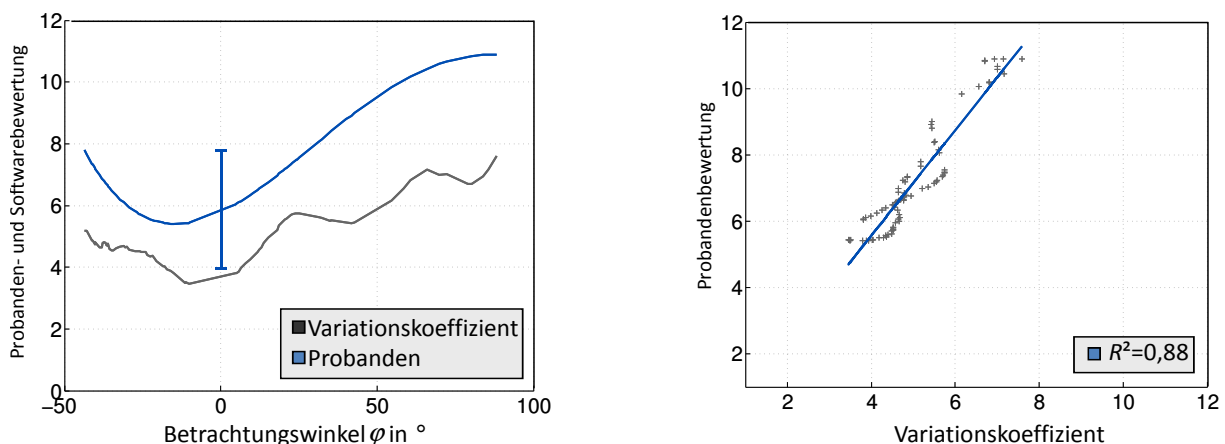




**Abbildung 4.16:** Prinzipdarstellung der in der Probandenstudie verwendeten Rotationsfunktion des Aufnehmers für die Untersuchungsobjekte. Außerdem sind die zwei untersuchten Leuchten dargestellt.

#### 4.4.2 Untersuchungsergebnisse

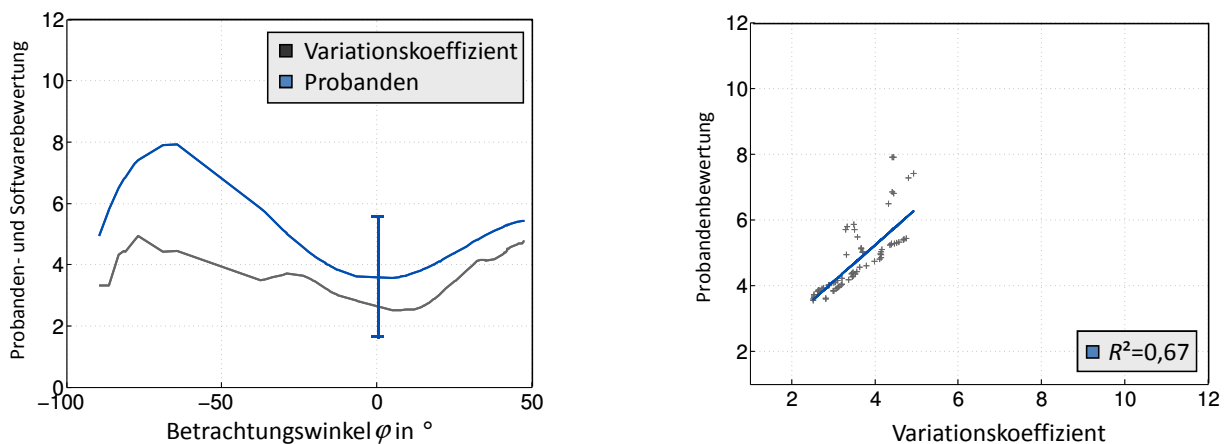
Abbildung 4.17 zeigt den Zusammenhang zwischen der Probandenbewertung je Beobachtungsposition und die Bewertung mittels Variationskoeffizient für die erste Leuchte. Die Kurve für die Probandenbewertung ergibt sich aus einer Polynominterpolation (*MATLAB*-Funktion *polyfit*, Polynomgrad: 4) aller Einzelergebnisse der Untersuchung. Dieser Schritt ist nötig, da zu fast jedem Betrachtungswinkel nur ein einziges Ergebnis zur Verfügung steht. Das Bestimmtheitsmaß zwischen Probanden- und Softwarebewertung ist mit  $R^2 = 0,88$  für ein doch recht subjektives Thema, wie es die wahrgenommene Gleichmäßigkeit ist, überraschend hoch und stellt eine Bestätigung des allgemeinen Modells dar.



**Abbildung 4.17:** Ergebnisse der Winkeluntersuchungen für Versuchsobjekt 1. links: Dargestellt ist die interpolierte Polynomfunktion aus den Probandenbewertungen für die unterschiedlichen Betrachtungswinkel, der Standardfehler (exemplarisch an der Stelle  $0^\circ$ ) und die Softwarebewertung mittels des Variationskoeffizienten; rechts: Bestimmtheitsmaß zwischen der Probandenbewertung und dem Variationskoeffizient.

Die Auswertung für die zweite Leuchte ist in Abbildung 4.18 zu sehen. Die Abbildung zeigt ebenfalls den Zusammenhang zwischen der Probandenbewertung je Beobachtungsposition und

der Bewertung mittels Variationskoeffizient durch die Software. Des Weiteren ist das Bestimmtheitsmaß zwischen Probandenbewertung und Softwarebewertung zu erkennen.



**Abbildung 4.18:** Ergebnisse der Winkeluntersuchungen für Versuchsobjekt 2. links: Dargestellt ist die interpolierte Polynomfunktion aus den Probandenbewertungen für die unterschiedlichen Betrachtungswinkel, der Standardfehler (exemplarisch an der Stelle 0°) und die Softwarebewertung mittels des Variationskoeffizienten; rechts: Bestimmtheitsmaß zwischen der Probandenbewertung und dem Variationskoeffizient.

Es ist auffällig, dass hier der Zusammenhang eher niedrig ausfällt. Die Vermutung liegt nahe, dass dies in den zwei leuchtenden Flächen begründet liegt, was die Probanden eher zu einer vergleichenden Bewertung zwischen den leuchtenden Flächen bringt. Dies wird auch durch Anmerkungen im Fragebogen bestätigt. Deswegen werden für diese Leuchte weitere Softwarebewertungen durchgeführt, um ein angepasstes Modell zu finden, welches die zwei leuchtenden Flächen mit berücksichtigt.

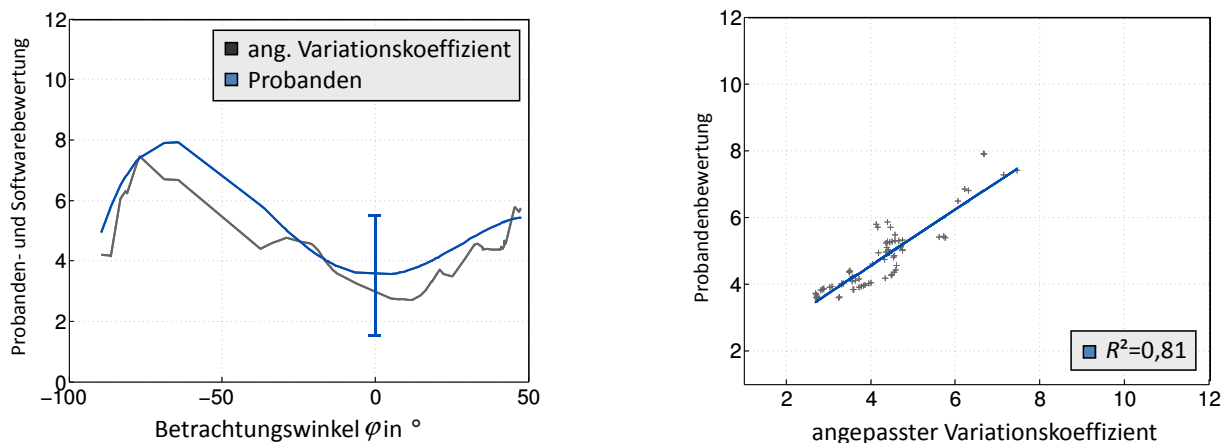
Für folgende Modelle wird eine Verbesserung erwartet:

1. Differenz der mittleren Leuchtdichten der einzelnen leuchtenden Flächen
2. Variationskoeffizient beider leuchtender Flächen + Differenz der mittleren Leuchtdichten der einzelnen leuchtenden Flächen
3. Variationskoeffizient beider leuchtender Flächen + Differenz der Variationskoeffizienten der einzelnen leuchtenden Flächen

Die Auswertung ergab, dass nur das zuletzt genannte Modell die Korrelation zur Probandenbewertung erhöht. Die Ergebnisse mit dem angepassten Modell sind in Abbildung 4.19 gezeigt. Das angepasste Modell berechnet nicht nur für jede Betrachtungsrichtung den Variationskoeffizient aller leuchtenden Flächen, sondern berücksichtigt zusätzlich noch die Differenz zwischen den Variationskoeffizienten der einzelnen leuchtenden Flächen für jeden Winkel, indem dieser zum Variationskoeffizient einer jeden Betrachtungsrichtung hinzuaddiert wird:

$$V_{\Delta lf} = V + \Delta V. \quad (4.2)$$

Damit erhöht sich das Bestimmtheitsmaß auf einen Wert von  $R^2 = 0,81$ . Die Herleitung der Berechnung ist in Abschnitt B.6 ab Seite 141 dargestellt.



**Abbildung 4.19:** Ergebnis für Versuchsobjekt 2, mit dem auf zwei leuchtende Flächen angepassten Modell des Variationskoeffizienten. links: Dargestellt ist die interpolierte Polynomfunktion aus den Probandenbewertungen für die unterschiedlichen Betrachtungswinkel, der Standardfehler (exemplarisch an der Stelle  $0^\circ$ ) und die Softwarebewertung mittels des Variationskoeffizienten; rechts: Bestimmtheitsmaß zwischen der Probandenbewertung und dem Variationskoeffizient.

Den gezeigten Diagrammen ist zu entnehmen, dass der Variationskoeffizient bereits ein sehr gutes Maß für die Bewertung der Gleichmäßigkeit darstellt, speziell immer dann, wenn keine weiteren Informationen zur Leuchte zur Verfügung stehen. Die Auswertung mittels des angepassten Modells zeigt außerdem, wie spezielle Effekte und Eigenheiten gesondert berücksichtigt werden müssen.

## 4.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt erfolgt die Zusammenfassung zu den Untersuchungen. Die kritische Diskussion der Ergebnisse befindet sich in Kapitel 6 ab Seite 111.

Probandenuntersuchungen bewegen sich prinzipiell im Spannungsfeld zwischen Reproduzierbarkeit des Versuchs und der zu erreichenden Aussagekraft für natürliche Bedingungen. Um signifikante Ergebnisse zu erhalten, sind meist Abstraktionen und Vereinfachungen nötig. Eine Prüfung der Übertragbarkeit auf die Realität, also in diesem Fall die Rückleuchtenbewertung durch die Mitarbeiter von Versuch, Konstruktion und dem Management, ist durchzuführen. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Empirie einer üblicherweise vorliegenden Aufmerksamkeitssteigerung des Probanden unterliegt, welche das Untersuchungsergebnis beeinflussen kann. Erschwerend kommt hinzu, dass die Bewertung der Gleichmäßigkeit ein stark subjektives Thema ist, welches vom aktuellen Gemütszustand und vor allem der themenspezifischen Vorbildung des Probanden abhängt. Als besonders relevant erweist sich die Problematik, dass das Thema für die Probanden natürlich weit weniger im Fokus steht als innerhalb der zuständigen Entwicklungsabteilung für die Lichttechnik. Diese Erkenntnis hat zur Folge, dass zu Beginn einer jeden Untersuchung eine kurze Präsentation zu den Themen Kfz-Leuchtenentwicklung im Allgemeinen und dem Gütemerkmal Gleichmäßigkeit von Signalleuchten im Speziellen erfolgt. Innerhalb der Präsentation werden Beispiele von Kfz-Leuchten und mögliche Beanstandungen

gezeigt, siehe Abbildung 1.1 auf Seite 15. Dadurch werden die Probanden entsprechend sensibilisiert und an das Thema herangeführt.

Mithilfe der psychophysikalischen Untersuchungen sind eine Vielzahl von Ergebnissen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit in Abhängigkeit von der Umgebungsleuchtdichte und grundsätzliche Annahmen zur Kontrastbewertung bestätigt und ergänzt worden. In den Untersuchungen wird ein allgemeines Modell zur Bewertung der Gleichmäßigkeit abgeleitet und ein leicht angepasstes Modell, mit dem auf eine besondere Beschaffenheit einer Leuchte reagiert wird, untersucht. Außerdem hat die Untersuchung mit den drehbaren Leuchten und der stark variierenden Bewertung der Gleichmäßigkeit durch die Probanden gezeigt, dass eine Beurteilung von Signalleuchten aus nur einer einzigen Richtung unzureichend ist, da viele störende Effekte nur innerhalb kleinerer Betrachtungswinkelintervalle auftreten.

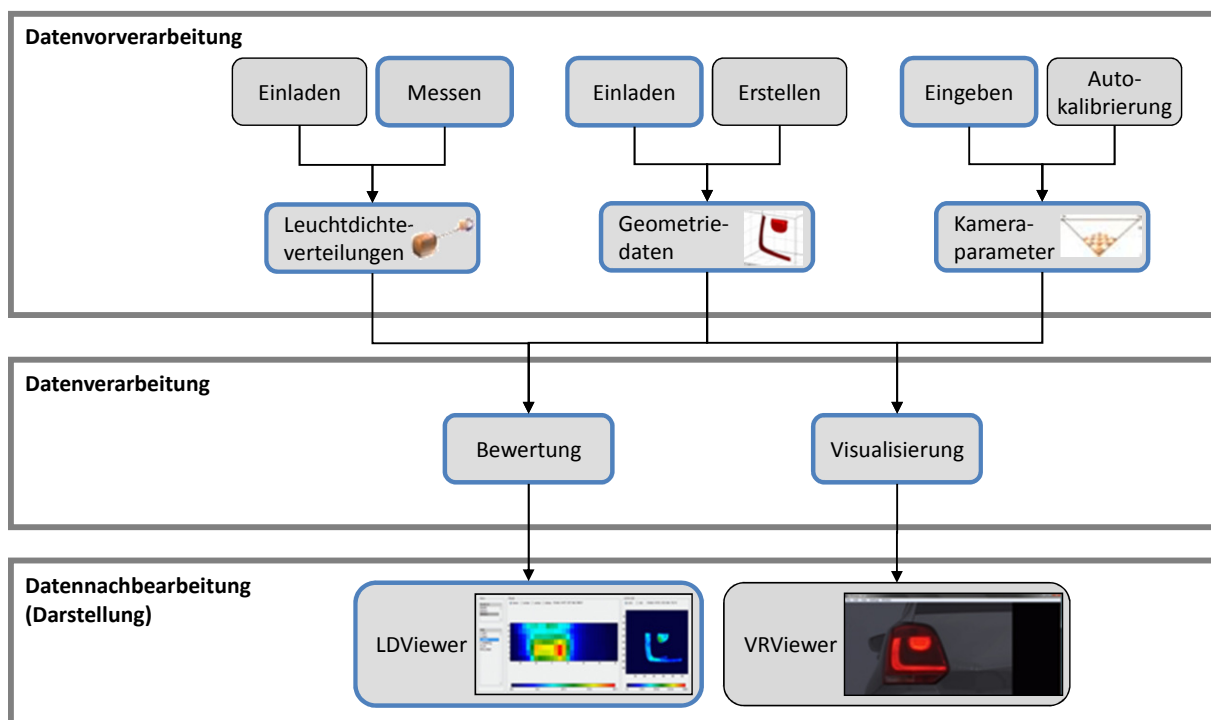
Die Ergebnisse der Untersuchungen dienen innerhalb der Software als gute Datenbasis für die automatisierte Bewertung von Schlussleuchten hinsichtlich der Gleichmäßigkeit. Die gewonnenen Ergebnisse und die darauf fußenden Zusammenhänge sind allerdings erstmal nur für Kfz-Schlussleuchten, die auf dem gleichen oder ähnlichen optischen Wirkprinzip funktionieren, anwendbar. Eine breitere Anwendung der Gleichmäßigkeitsmodelle muss gesondert untersucht werden.

Eine zukünftige Untersuchung könnte sich speziell mit Gradienten und den zugehörigen metrischen Flächenmaßen beschäftigen und beispielsweise über speziell erzeugte Ungleichmäßigkeiten innerhalb einer leuchtenden Fläche Aussagen zur Wahrnehmung durch Probanden aufnehmen. Somit ließen sich Bewertungen durchführen, bei denen bestimmte Effekte im Lichtbild erkannt und beurteilt werden.



## 5 Verfahren zur Bewertung der Gleichmäßigkeit

Im folgenden Abschnitt werden die Anforderungen, welche an eine neue Messmethode gestellt werden, aufgezeigt und eine vollständige Umsetzung präsentiert. Es wird speziell auf die einzelnen Komponenten der Messeinrichtung, deren funktionaler Zusammenhang und die Bestandteile und Möglichkeiten der entwickelten Software eingegangen. Abbildung 5.1 zeigt die einzelnen Schritte, die zur Bewertung der Gleichmäßigkeit einer Kfz-Signalleuchte benötigt werden.



**Abbildung 5.1:** Bestandteile des Verfahrens zur Bewertung der Gleichmäßigkeit einer Kfz-Signalleuchte. Alle Bestandteile werden innerhalb dieses Kapitels erläutert, die farblich hervorgehobenen (□) werden im Detail betrachtet.

Das Bewertungsverfahren gliedert sich im Wesentlichen in die folgenden drei Hauptpunkte:

- **Datenvorverarbeitung**

Bereitstellen nötiger Eingangsdaten, wie die Leuchtdichteverteilungen und Geometrieinformationen zur Leuchte, und Festlegung der Parameter für die Bewertung, wie den Messbereich, die Kameraparameter und die Zuordnung der leuchtenden Flächen. Die Leuchtdichteverteilungen sind entweder bereits aus einer früheren Messung vorhanden

oder können mithilfe des Messsystems aufgenommen werden. Die nötigen Geometrieinformationen können direkt aus CAD-Daten gewonnen oder innerhalb der Bilddaten erzeugt werden. Die Kameraparameter können bei Kenntnis eingegeben oder mithilfe eines Kalibrierverfahrens geschätzt werden. Nähere Informationen zum Messaufbau und zugehörigen Kameraparametern werden in Abschnitt 5.1 beschrieben.

- **Datenverarbeitung**

Hauptbestandteil des Verfahrens, in dem alle bereitgestellten Daten ausgewertet und die Kriterien der Bewertung abgeprüft werden. Für die Verarbeitung müssen die Leuchtdichteverteilungen mit den Geometriedaten überlagert werden. Dies erfolgt mithilfe eines Optimierungsverfahrens, welches in Abschnitt 5.2.3 erläutert wird.

- **Datennachbearbeitung**

Der letzte Punkt besteht aus Methoden zur Aufbereitung und Darstellung der Messergebnisse in Form von zweidimensionalen Datenfeldern der einzelnen Bewertungskriterien. Zwei Verfahren zur Visualisierung der gemessenen Leuchtdichteverteilungen werden in Abschnitt 5.3.2 aufgezeigt.

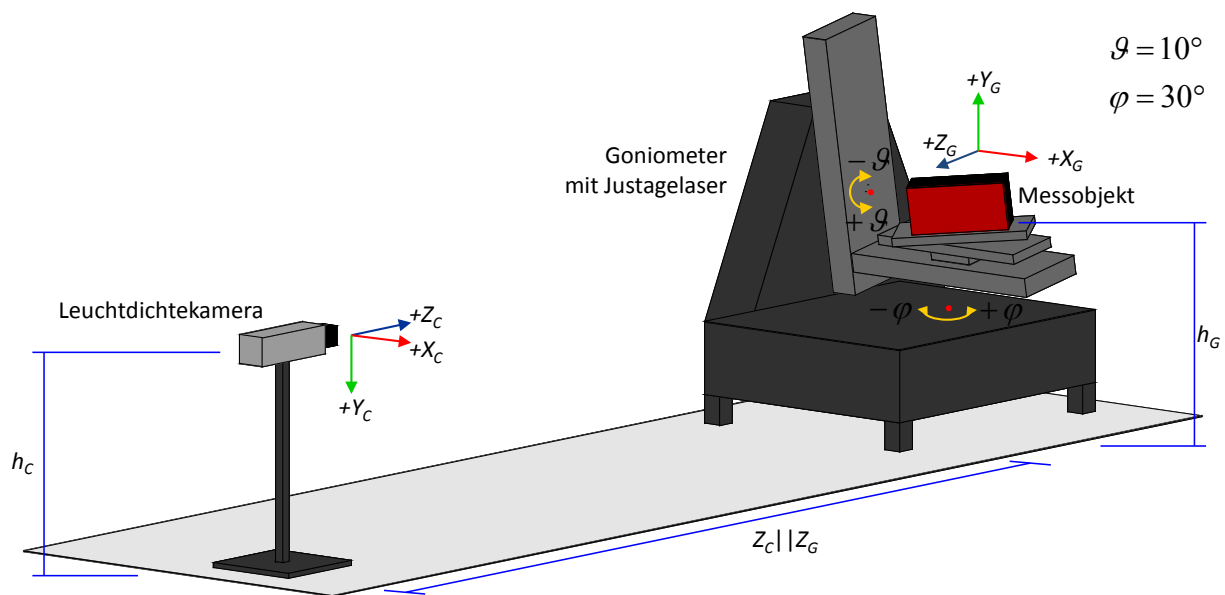
In den nachfolgenden Abschnitten wird ein Messaufbau gezeigt, mit dessen Hilfe automatisiert Leuchtdichteverteilungen aus definierten Winkelbereichen aufgenommen, nach unterschiedlichsten Kriterien bewertet und die Ergebnisse in kompakter und reproduzierbarer Form dargestellt werden können.

## 5.1 Messung von Leuchtdichteverteilungen aus definierten Betrachtungsrichtungen

Im Rahmen der Arbeit wird vorhandene Messtechnik zu einem neuen Messsystem kombiniert. Dieses Messsystem wird in den kommenden Abschnitten als  $LM_K^T$  bezeichnet. Diese Bezeichnung ergibt sich aus den zwei genutzten Hauptkomponenten: Einem Fernfeldphotogoniometer *GO-H 1200* der Firma *LMT* und einer Leuchtdichtemesskamera *LMK 96-2* der Firma *Techno-Team*. In Abbildung 5.2 sind beide Hardware-Komponenten des Messsystems dargestellt.

Die genutzte Kamera dient zur Messung orts aufgelöster Leuchtdichteverteilungen. Das Goniometer der Genauigkeitsklasse *L* nach [DIN50327] wird zur Messung von Beleuchtungsstärken nach den gesetzlichen Anforderungen eingesetzt. Durch die Integration der Kamera in den stationären Goniometeraufbau kann eine Messung der Leuchtdichteverteilungen direkt vor oder nach einer Beleuchtungsstärkemessung und damit während einer einzigen Aufspannung durchgeführt werden. Dies spart Zeit und minimiert die Fehleranfälligkeit, da Fachleute für den Aufbau, die Befestigung, den elektrischen Anschluss der Leuchte und die Bedienung der Geräte, zur Verfügung stehen. Sowohl die Kamera als auch das Goniometer bieten eine Softwarebibliothek zur Integration aller für das Messsystem nötigen Funktionen, wie beispielsweise das Verfahren des Goniometers an eine vorgegebene Position oder das Durchführen einer Leuchtdichtemessung mit der Kamera, in eine eigene Softwareanwendung [PKPK10, LMT02]. Die Steuerungssoftware ist prototypenhaft in der Softwareentwicklungsumgebung *MATLAB* umgesetzt.

Es könnte ebenfalls ein Nahfeldgoniometer zum Einsatz kommen. Dieses würde sich für die neue Messmethode auszeichnen, da es sich um ein leuchtdichtebasiertes Messsystem handelt



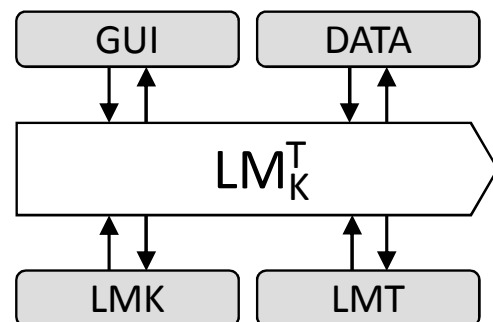
**Abbildung 5.2:** Prinzipdarstellung des Messaufbaus, dessen wesentliche Bestandteile eine Leuchtdichtemesskamera und ein Fernfeldphotogoniometer sind.

[Sch09]. Allerdings existieren für den speziellen Fall mehrere bauliche und strategische Vor- und Nachteile, die in Tabelle 5.1 gezeigt werden und letztendlich zu einer Entscheidung gegen eine Verwendung führen.

### 5.1.1 Bestandteile der Steuerungssoftware

In diesem Abschnitt wird die Steuerungssoftware und die Verarbeitung des Leuchtdichtedatenstroms vorgestellt. Die Testimplementierung der Software erfolgt in *MATLAB*, da es ein hohes Maß an Flexibilität während des Programmierprozesses bietet. Die erstellte Software ist nach den Prinzipien der Objektorientierung programmiert.

Nachfolgend werden die Klassen und die wichtigsten Methoden erläutert:



**Abbildung 5.3:** Hauptklassen

- $LM_K^T$

Stellt die Elternklasse des Programms dar. Sie beinhaltet administrative Aufgaben wie den Startvorgang, das Beenden und die Ausgabe von Statusnachrichten.

- **GUI**

In dieser Klasse sind alle Funktionen, welche die Benutzeroberfläche betreffen, enthalten. Wichtige Funktionen sind der Aufbau der Benutzeroberfläche und die definierten Reaktionen auf Interaktionen mit dem Anwender.

- **LMK**

Diese Klasse enthält alle Funktionen zur Ansteuerung der Kamera, wie beispielsweise das



**Tabelle 5.1:** Vor- und Nachteile des aufgebauten Messsystems gegenüber der Verwendung eines Nahfeldgoniometers.

Kriterium	Neues Messsystem	Nahfeldgoniometer
Integration	Die Messungen können direkt vor oder nach den Fernfeldmessungen der gesetzlichen Prüfungen erfolgen. Es ist geschultes Personal für den Anbau der Leuchten und die Bedienung des Fernfeldphotogoniometers vorhanden.	Ein Nahfeldgoniometer ist nicht Bestandteil der gesetzlichen Prüfungen.
Messabstand	Der Abstand lässt sich groß wählen, was auftretendes Streulicht reduziert und außerdem die zur Verfügung stehende Schärfebene vergrößert. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Messauflösung vom Abstand abhängig ist.	Der Abstand ist sehr klein, dadurch ist nur ein kleiner Schärfbereich und ein geringes Blickfeld der Kamera vorhanden, was für mehrteilige Leuchten nachteilig ist. Größeres Blickfeld nur bei Inkaufnahme von Streulicht und geometrischen Verzerrungen möglich, was eine korrekte Zuordnung der Strahlinformationen auf der Hüllgeometrie deutlich erschwert.
Perspektive	Die Perspektive kann über den Messabstand festgelegt werden. Üblicherweise wird ein Messabstand von 3-6 m gewählt, was ein guter Kompromiss zwischen einer Ampelsituation, der Designbewertung und einer formatfüllenden Darstellung der Leuchte innerhalb der Leuchtdichteverteilungen ist. Allerdings ist somit nur eine einzige Perspektive darstellbar.	Durch das Erzeugen von Strahldaten bei einer Nahfeldmessung, kann im Anschluss nahezu jeder beliebige Messabstand für die Berechnung der Leuchtdichteverteilungen eingestellt werden. Hier stellt allerdings die Festlegung der Leuchtenhüllgeometrie eine große Herausforderung dar.
Dynamikumfang	Es sind Messungen mit hohem Dynamikumfang möglich, da die Leuchte während der Bildaufnahme nicht bewegt wird [PKP07]. Mehrfachbelichtungen sind für Kfz-Leuchten, die meist eine ausgeprägte Richtungscharakteristik aufweisen, nötig.	Mehrfachbelichtungen werden üblicherweise nicht durchgeführt, da die Leuchte in Bewegung gemessen wird. Dieses Prinzip ist eher ungeeignet für die Messung kontrastreicher Objekte [Sch10].
Brennlage	Die Leuchte wird während der Messung bewegt und damit wird auch die Brennlage der Lichtquelle verändert.	Die Lichtquelle kann in beliebiger Brennlage betrieben werden und wird während der Messung nicht bewegt.
Aufbau	Die Leuchtdichtemesskamera wird nach der Einrichtung nicht mehr bewegt und könnte auch fest verbaut werden.	Es ist ein stabiler Aufbau mit festem Bezug der Komponenten zueinander vorhanden.

Festlegen der Integrationszeit, das Aufnehmen einer Leuchtdichteverteilung oder einfach nur die Anzeige des aktuellen Kamerabildes.

- **LMT**

Diese Klasse dient der Ansteuerung des Goniometers. Wichtige Bestandteile sind das Rotieren des Tisches in horizontaler oder vertikaler Betrachtungsrichtung und die Abfrage, ob das System gerade in Bewegung ist. Dadurch kann bei der Anfahrt eines Messpunktes verhindert werden, dass die Kamera bereits ein Bild aufnimmt während sich der Goniometertisch noch bewegt.

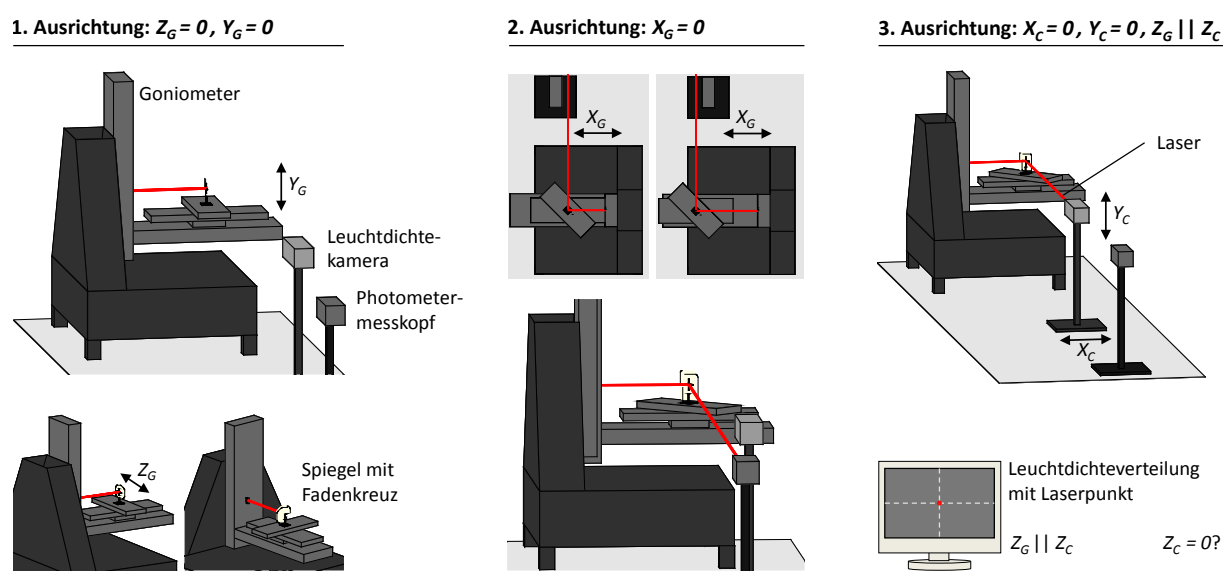
- **DATA**

In dieser Klasse werden alle Informationen zu den Daten einer Messung gehalten. Wichtige Funktionen sind das Einladen und Speichern und die Manipulation von Datensätzen. Zur Manipulation gehören hierbei die Transformation von Geometriedaten oder Bildverarbeitungsoperationen für die Leuchtdichteverteilungen.

### 5.1.2 Aufbau und Ausrichtung der einzelnen Komponenten

Damit eine hinreichend genaue Messung einer Leuchte erfolgen kann, müssen die zwei Hardware-Komponenten zueinander ausgerichtet werden. Das heißt, dass die optische Achse der

Leuchtdichtekamera  $Z_C$  und die des Goniometers  $Z_G$  anschließend identisch sind oder zumindest annähernd parallel zueinander verlaufen. Durch den ortsfesten Aufbau des Goniometers erfolgt der maßgebliche Anteil der Ausrichtung an der Kamera. Für die Ausrichtung können die weiteren Bestandteile des Fernfeldphotogoniometers, wie der im Lichttunnel in 25 m Abstand fest verbaute Beleuchtungsstärkemesskopf, genutzt werden. Die einzelnen Schritte der Ausrichtung sind in Abbildung 5.4 gezeigt. Mithilfe des Justagelasers, der im Goniometer integriert ist und einem planen Spiegel mit aufgedrucktem Fadenkreuz, der in Richtung des Lasers zeigt, können zuerst die Nullpunkte  $Z_G = 0$  und  $Y_G = 0$  des Goniometerkoordinatensystems bestimmt werden. Anschließend wird der Spiegel auf  $45^\circ$  rotiert und somit der Laserstrahl in den Lichttunnel hinein gelenkt. Durch Verschieben des Spiegels in  $X$ -Richtung, kann  $X_G = 0$  bestimmt werden. Der  $X$ -Nullpunkt ist erreicht, wenn der Laser genau den Mittelpunkt des Beleuchtungsstärkemesskopfes trifft. Anschließend wird die Leuchtdichtemesskamera im Lichtweg des Lasers positioniert. Dabei sollte der Laserstrahl den Objektivmittelpunkt treffen. Am Bildschirm erfolgt anschließend die Ausrichtung der Kamera derart, dass sich der innerhalb der Leuchtdichtevertelung angezeigte Laserpunkt genau in der Mitte der Sensorfläche befindet. Durch dieses Vorgehen liegen die optischen Achsen von Kamera und Goniometer annähernd parallel zueinander.



**Abbildung 5.4:** Dargestellt sind die einzelnen Schritte der Komponentenausrichtung. links: Ausrichtung  $Z_G, Y_G$ ; Mitte: Ausrichtung  $X_G$ ; rechts: Ausrichtung  $Z_C$  auf  $Z_G$  und Positionierung des Goniometernullpunktes im Mittelpunkt der Bildkoordinaten. Mittels dieser Methode lässt sich jedoch nicht genau der Abstand zwischen Kamera und Objekt bestimmen.

Der Messabstand der Kamera sollte so gewählt sein, dass die Leuchte möglichst formatfüllend innerhalb der Leuchtdichteverteilung abgebildet wird. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Leuchte während der Rotation zu einer beliebigen Betrachtungsrichtung eventuell eine größere Ausdehnung hat als aus der direkten Draufsicht. Dies kann durch Anfahren ausgewählter Winkel überprüft werden. Gegebenenfalls muss der Abstand zwischen Kamera und Objekt noch geringfügig angepasst und damit der letzte Schritt der Ausrichtung wiederholt werden.

Über die Ausrichtung kann das optische Zentrum der Kamera  $Z_C = 0$  und damit der Messabstand nur auf einige Millimeter genau und somit nicht eindeutig bestimmt werden. Es variiert

außerdem je nach eingestellter Schärfeebene. Die innerhalb der Panoramafotografie genutzte Methode der Eintrittspupillenbestimmung mithilfe eines Nodalpunktadapters eignet sich nach eigenen Tests nur bedingt, da sie bei der Verwendung von Teleobjektiven im Allgemeinen und den kurzen Abständen zwischen Kamera und Messobjekt im Speziellen, zu ungenau ist. Für die spätere Auswertung ist der genaue Abstand zwischen den Ursprüngen der zwei Koordinatensysteme jedoch sehr wichtig, weswegen eine weitere Ausrichtung nachgelagert ist, die das optische Zentrum und damit den genauen Abstand zwischen Kamera und Objekt bestimmt. Die zweite Ausrichtung erfolgt erst innerhalb der Software und nachdem alle gewünschten Leuchtdichteverteilungen aufgenommen sind. Sie wird in Kapitel 5.2.3 detailliert beschrieben.

### 5.1.3 Vorbereitung und Messdurchführung

In diesem Abschnitt wird das prinzipielle Vorgehen eines vollständigen Messablaufs beschrieben. Es werden zuerst die der Messung vorangestellten Arbeitsschritte erläutert und anschließend die eigentliche Messung.

Zu Beginn muss die Leuchte auf dem Goniometertisch befestigt werden. Dazu wird ein Testgestell verwendet, welches der korrekten Positionierung der Leuchte in Fahrzeugeinbaulage dient. Durch das Gestell werden also unter anderem Verkippungen der Leuchte vermieden. Dadurch wird eine spätere Auswertung der Leuchtdichteverteilungen möglich, da auch die für die Auswertung eingesetzten Geometriedaten in Einbaulage vorliegen. Anschließend wird die gewünschte Lichtfunktion elektrisch angeschlossen. Es wird eine kalibrierte Messlampe verwendet.

Innerhalb der Steuerungssoftware müssen nun ein geeigneter Messbereich und die zugehörige Messauflösung ausgewählt werden. Als grobe Orientierung können hier die gesetzlichen Vorgaben für die Lichtstärkemessungen dienen. Die Winkel für die Lichtstärkeverteilung sind in Abschnitt 2.2 auf Seite 22 beschrieben. Zusätzlich sollten größere vertikale Betrachtungswinkel berücksichtigt werden, da diese speziell aus ästhetischen Betrachtungsweisen heraus relevant sind. Innerhalb der Arbeit wird folgender Messbereich für eine Schlusslichtfunktion genutzt:

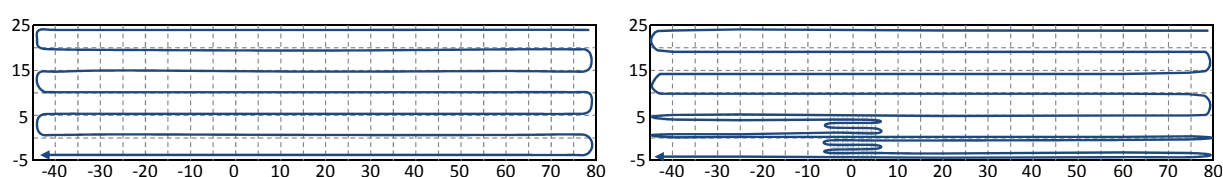
$$\begin{aligned} -45^\circ \leq \varphi \leq 80^\circ, \\ -15^\circ (-5^\circ) \leq \vartheta \leq 25^\circ. \end{aligned}$$

Die Messauflösung, also die Schrittweite zwischen den einzelnen gemessenen Betrachtungsrichtungen, kann ebenfalls aus den gesetzlichen Anforderungen abgeleitet werden. Die kleinste definierte Schrittweite innerhalb der gesetzlichen Anforderungen entspricht  $\vartheta_{\text{step}} = 5^\circ$  und  $\varphi_{\text{step}} = 5^\circ$ , was sich auch für die Leuchtdichtemessungen als praktikabel erweist. Damit äquidistante Schrittweiten vorliegen, wird diese kleinste Schrittweite jedoch für den gesamten Messbereich genutzt. Über nachfolgende Gleichung ergibt sich, dass bei der gewählten Schrittweite genau  $n_{\text{LDV}} = 182$  Leuchtdichteverteilungen aufgenommen und ausgewertet werden müssen:

$$n_{\text{LDV}} = \left( \frac{(\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}})}{\varphi_{\text{step}}} + 1 \right) \cdot \left( \frac{(\vartheta_{\text{max}} - \vartheta_{\text{min}})}{\vartheta_{\text{step}}} + 1 \right), \text{ mit } n_{\text{LDV}} \in \mathbb{N}. \quad (5.1)$$

Dies stellt einen guten Kompromiss aus benötigter Zeit und auswertbarer Datenmenge dar. In manchen Fällen kann eine höhere Auflösung erforderlich sein, was jedoch zu verlängerten Messzeiten, einem erhöhten Speicherplatzbedarf und einer längeren Auswertedauer führt.

Außerdem führt eine höhere Auflösung auch in den eher uninteressanten Bereichen zu deutlich mehr Informationen. Als Kompromiss zwischen Messzeit und Messauflösung ist eine weitere Funktion in die Software integriert, die es ermöglicht, in einem speziellen Messbereich eine höhere Auflösung zu wählen. Abbildung 5.5 zeigt diese adaptive Methode an einem Beispiel. Bei der Umsetzung wurde das baulich bedingte, deutlich langsamere Bewegen des Goniometers bei vertikaler Rotation mit berücksichtigt, was zu selteneren und distanzmäßig kürzeren vertikalen Positionsänderungen führt. Durch die Erweiterung der Messmethode ist es möglich, statistisch häufiger auftretende Blickrichtungen auf eine Leuchte, wie beispielsweise zwischen  $-5^\circ \leq \varphi \leq 5^\circ$  horizontal und  $0^\circ \leq \vartheta \leq 10^\circ$  vertikal [Rip01a], in einem feineren Raster von zum Beispiel  $\vartheta, \varphi_{\text{step}} = 1^\circ$  aufzunehmen. Dies ergibt eine Anzahl von insgesamt  $n_{\text{LDV}} = 294$  aufzunehmenden Leuchtdichteverteilungen gegenüber den 3906 Verteilungen bei Verwendung der feinen Messauflösung und äquidistanter Schrittweite.



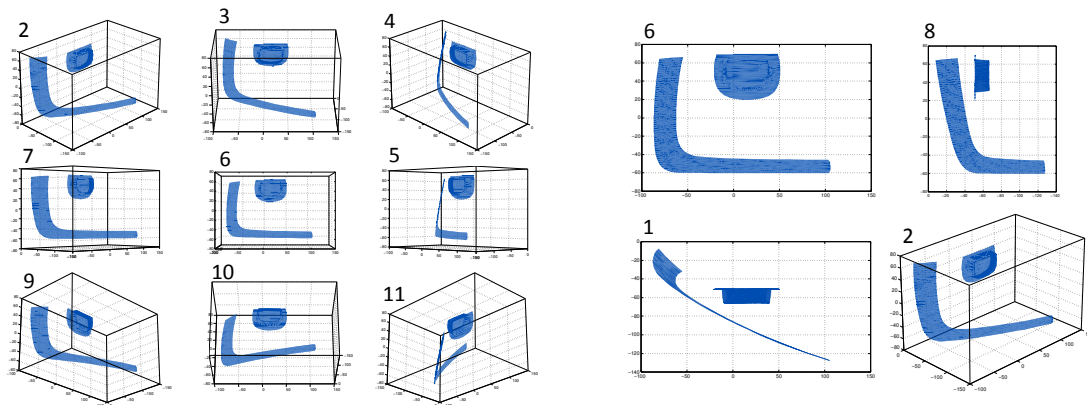
**Abbildung 5.5:** links: Statischer Messbereich; rechts: Adaptiver Messbereich, um statistisch häufiger auftretende Blickrichtungen auf Schlussleuchten mit einer feineren Auflösung in einem ausgewählten Messbereich zu berücksichtigen. Der Verfahrensweg des Goniometers ist ebenfalls dargestellt (□).

Nachdem der Messbereich und die -auflösung ausgewählt sind, erfolgen die Justagemessungen. Diese dienen der Ausrichtung der Geometriedaten über den Leuchtdichteverteilungen. Tabelle 5.2 zeigt die Winkel, die während der Justagemessungen berücksichtigt werden. Abbildung 5.6 zeigt schematisch die elf ausgewählten Leuchtenansichten. Die Leuchtdichteverteilungen der Justagemessung dienen einerseits der automatischen Positionierung der Geometriedaten über den Leuchtdichteverteilungen, was in Abschnitt 5.2.3 näher erläutert wird, und andererseits zur manuellen Erstellung von Geometrieinformationen mithilfe der in Anhang B.2 ab Seite 135 vorgestellten Methode. Letzteres wird dann nötig, wenn keine CAD-Daten für das Messobjekt zur Verfügung stehen, dieses aber trotzdem mit dem neuen Verfahren bewertet werden soll.

**Tabelle 5.2:** Horizontale und vertikale Betrachterwinkel, die während der Justagemessungen angefahren werden.

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
hor. Betrachterwinkel $\varphi$ in $^\circ$	0°	45°	0°	-45°	-45°	0°	45°	90°	45°	0°	-45°
ver. Betrachterwinkel $\vartheta$ in $^\circ$	90°	25°	25°	25°	0°	0°	0°	0°	-25°	-25°	-25°

Im Anschluss an die Justagemessung erfolgt die eigentliche Messung. Nachdem diese gestartet ist, werden nacheinander die vorgegebenen Betrachtungsrichtungen angefahren und sobald das Goniometer eingeschwungen ist, wird die Leuchtdichteverteilung gemessen. Wie bereits in Tabelle 5.1 beschrieben, kann durch dieses sequentielle Anfahren der diskreten Betrachtungsrichtungen und die anschließend ruhende Leuchte eine Messung mit hohem Dynamikumfang durchgeführt werden. Dies geschieht durch Aufnahme mehrerer Leuchtdichteverteilungen mit unterschiedlicher Integrationszeit und der anschließenden geeigneten Überlagerung der Aufnahmen zu einer Verteilung, die sowohl in hellen als auch dunkleren Bildbereichen einen hohen Informationsgehalt aufweist. Allerdings erhöht sich dadurch die Messzeit, die pro Leuchtdich-



**Abbildung 5.6:** Darstellungen zu den Betrachterwinkeln der Justagefahrt (in Tab. 5.2). Veranschaulichung der ausgewählten Leuchtenansichten.

teverteilung benötigt wird. Die Messzeiten sind des Weiteren abhängig von der Grundbelichtungszeit, also der kürzesten Integrationszeit, dem jeweiligen Verfahrensweg des Goniometers und der Art der Messung, adaptiv oder mit äquidistanter Schrittweite zwischen den Messpositionen. Tabelle 5.3 zeigt die einzelnen Bestandteile der Vorbereitung und der Messung und die dafür im Durchschnitt beanspruchten Zeiten.

**Tabelle 5.3:** Durch die einzelnen Bestandteile einer Messung beanspruchte Zeiten.

Name	Beinhaltet	Häufigkeit	Dauer
Aufbau	Ausrichtung der Koordinatensysteme von Goniometer und Kamera zueinander	einmalig	60 min
Leuchte	Einbau in Testgestell, Befestigung und Ausrichtung auf dem Goniometertisch	einmal pro Messung	15 min
Justagemessung	Aufnahme der 11 Leuchtdichteverteilungen, gegebenenfalls Nachjustage	1-3 mal pro Messung	15 min
Messung	Aufnahme aller Leuchtdichteverteilungen (z. B. $n_{LDV} = 182$ für ein Schlusslicht)	einmal pro Messung	45 min

Nachdem alle Leuchtdichteverteilungen aufgenommen sind, können die Daten unter anderem für eine Präsentation mithilfe des in Abschnitt 5.3.2 vorgestellten Verfahrens visualisiert oder mit dem in den nächsten Abschnitten vorgestellten Ansatz ausgewertet werden.

## 5.2 Bestimmung der Lichtaustrittsflächen für eine automatisierte Auswertung

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ist für die Bewertung einer oder mehrerer Leuchtdichteverteilungen nach einem der definierten Kriterien, die Kenntnis der genauen geometrischen Lage der Lichtaustrittsflächen notwendig. Im nachfolgenden Kapitel werden die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Gewinnung der geometrischen Informationen erläutert. Dabei ist einerseits wichtig, wie zu den nötigen Geometrieinformationen gelangt werden kann und andererseits, wie diese projektiv transformiert werden müssen, damit sie mit den aufgenommenen Leuchtdichteverteilungen übereinstimmen. Es müssen also die Parameter der Leuchtdichtekamera, die beispielsweise eine Auswirkung auf die perspektivische Verzerrung haben, mit berücksichtigt werden.

In den ersten zwei Abschnitten wird auf das Bereitstellen der Geometrieinformationen für das Messsystem und die projektive Transformation für die korrekte Darstellung dieser Daten eingegangen. Im Anschluss daran wird erläutert, wie die Geometriedaten über den Leuchtdichteverteilungen positioniert werden. Dafür kommt ein Optimierungsverfahren zum Einsatz.

### 5.2.1 Nutzung von Geometriedaten

Wenn die Konstruktionsdaten zu einer Leuchte in Form von dreidimensionalen Modellen vorliegen, können diese Informationen für die Auswertung der Leuchtdichteverteilungen genutzt werden. Die Software unterstützt momentan folgende, in der Automobilindustrie gebräuchliche, Datenformate:

- **IGES**

Die **I**nitial **G**raphics **E**xchange **S**pecification beschreibt ein neutrales, herstellerunabhängiges Datenformat zum Austausch von Geometriedaten zwischen verschiedenen CAD-Programmen [IGES53].

- **STEP**

Der **S**tandard for the **E**xchange of **P**roduct **M**odel **D**ata beschreibt ein allgemeines Datenaustauschformat, welches formal nach ISO-Norm 10303 definiert ist [ISO10303].

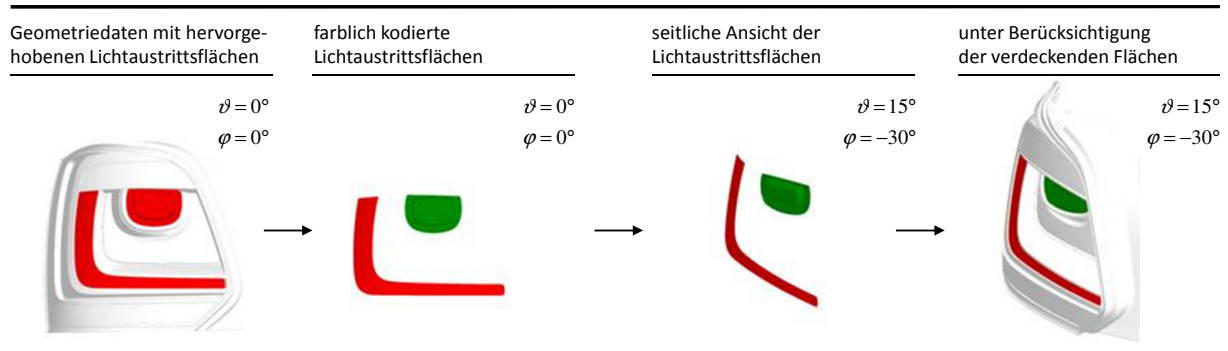
Damit die Software die Daten verarbeiten kann, müssen diese für eine ordnungsgemäße Verwendung vorab von Hand aufbereitet werden. Dies erfolgt über eine farbliche Kodierung der einzelnen Bestandteile. Die Kodierung der Daten erfolgt bereits im CAD-Programm und ist, wie in Tabelle 5.4 beschrieben, aufgebaut. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass Geometriedaten, die keinen weißen oder roten Farbcode haben, bei der Auswertung nicht mit berücksichtigt werden. Die Lichtaustrittsflächen werden mit unterschiedlichen Rottönen gekennzeichnet. Die weißen Flächen sind diejenigen, die aus einer bestimmten Betrachtungsrichtung, eventuell die Sicht auf die Lichtaustrittsflächen teilweise oder vollständig verdecken können.

**Tabelle 5.4:** Unterscheidung der Geometriedaten nach ihrer farblichen Kodierung, die bereits im CAD-Programm festgelegt werden kann.

Farbcode	Bezeichnung	Beschreibung
FF0000	Rot 1	Erste Lichtaustrittsfläche
FE0000	Rot 2	Zweite Lichtaustrittsfläche
FD0000	Rot 3	Dritte Lichtaustrittsfläche usw.
FFFFFF	Weiß	Geometriedaten, die aufgrund ihrer Lage im Raum, bei Blick aus einer bestimmten Betrachtungsrichtung, Teile der Lichtaustrittsflächen verdecken können.
	übrige	Alle anders farbigen Geometrien werden in der Auswertesoftware nicht mit berücksichtigt. Dadurch wird die projektive Transformation der Daten und somit die gesamte Auswertung beschleunigt.

Nachdem die relevanten von den irrelevanten Geometrieinformationen getrennt sind, stehen für die übrigen Geometrien wieder alle Farben zur Verfügung. Für eine einfachere Unterscheidung der Lichtaustrittsflächen werden diesen automatisch neue Farben zugewiesen, die sich stärker unterscheiden, wie beispielsweise grün (00FF00) oder blau (0000FF). Die Zuweisung der Farbe erfolgt über eine Lookup-Tabelle in der geeignete Farbcodes abgelegt sind. Abbildung 5.7 zeigt beispielhaft die Lichtaustrittsflächen einer Signalleuchte eines aktuellen Fahrzeuges aus zwei

unterschiedlichen Ansichten. Die seitliche Ansicht zeigt, dass einige Teile der Lichtaustrittsflächen durch andere Bauteile der Leuchte verdeckt werden. Dies wird in der Software mit berücksichtigt.



**Abbildung 5.7:** links: Geometriedaten einer Kfz-Schlussleuchte; Mitte: farblich markierte unterschiedliche Lichtaustrittsflächen; rechts: Darstellung der Lichtaustrittsflächen unter Berücksichtigung von verdeckenden Flächen.

Im nächsten Abschnitt wird erläutert, wie die Geometriedaten transformiert werden müssen, damit sie einer Darstellung der Leuchtdichtekamera entsprechen.

### 5.2.2 Perspektivische Projektion der Geometriedaten

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, kommt in dem Messsystem eine Leuchtdichtekamera vom Typ *LMK 96-2* zum Einsatz. Die Kameraparameter können dem Kalibrierprotokoll und der Sensorchipbeschreibung entnommen werden [Krü09, Son99]. Weitere relevante Parameter, wie zum Beispiel der Messabstand, müssen dem jeweiligen Messaufbau entnommen werden. Zusammengefasst sind folgende Parameter für die projektive Transformation relevant:

- Objektivbrennweite:  $f_{O2} = 50 \text{ mm}$ ,
- effektive CCD-Chip-Auflösung:  $659 \times 494 \text{ Pixel}$ ,
- Pixelkantenlänge (quadratisch):  $d_{\text{pixel}} = 7,4 \text{ }\mu\text{m}$  und
- Messabstand (Koordinatenursprung von Kamera und Goniometer):  $r = 3,775 \text{ m}$ .

Neben diesen Daten sind noch die Verschiebungen  $u_0, v_0$  des Sensorkoordinatenmittelpunktes zum Kamerahauptpunkt  $c$  relevant, die zu diesem Zeitpunkt sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung zu 0 gesetzt werden müssen, was nach der in Abschnitt 5.1.2 erläuterten Ausrichtung annähernd stimmt. Eine hinreichend genaue Bestimmung dieser Parameter und des Messabstandes erfolgt mithilfe einer Optimierung und wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert. Die vollständige perspektivische Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  ergibt sich aus den Gleichungen für die externe Transformation (2.9), die perspektivische Transformation (2.13) und die interne Transformation (2.15) zu:

$$\mathbf{P} = \mathbf{H}\mathbf{P}'\mathbf{D}. \quad (5.2)$$



Anschließend kann über eine einzelne Matrixmultiplikation mit allen 3D-Punkten der Geometrie in homogenen Koordinaten, die projektive Transformation der Geometrieinformationen, nach dem in Abschnitt 2.5 ab Seite 34 erläuterten Vorgehen, durchgeführt werden.

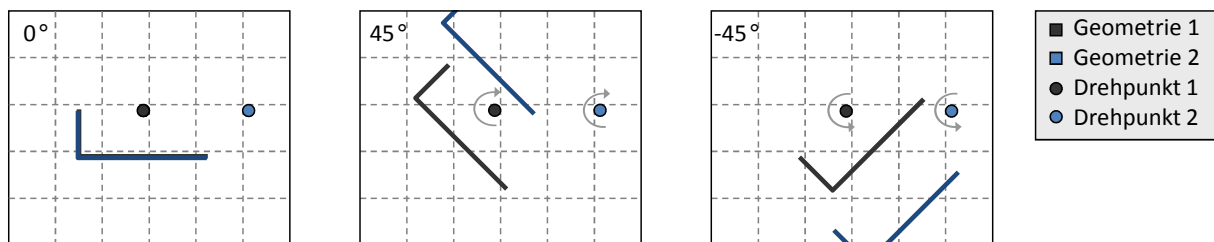
Die Rotation der Geometriedaten entsprechend der ausgewählten Betrachtungsrichtung ist dabei nicht Bestandteil obiger Gleichung. Die Anpassung der Geometriedaten an die jeweilige Richtung erfolgt über zwei Matrixmultiplikationen aller Datenpunkte mit den ersten zwei Faktoren der nicht kommutativen Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{\text{geo}}$  aus Gleichung (2.8) von Seite 35. Zusammengesetzt ergibt das für den Bildpunkt  $\tilde{\mathbf{m}}$  eines jeden Punktes  $\tilde{\mathbf{M}}_{\text{geo}}$  in eine bestimmte Betrachtungsrichtung  $\vartheta, \varphi$  ausgedrückt in  $\mathbf{R}_{\text{geo}}$  folgende Berechnung:

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{P} \mathbf{R}_{\text{geo}} \tilde{\mathbf{M}}_{\text{geo}} . \quad (5.3)$$

Dank der durchgängigen Verwendung homogener Koordinaten und der Reduktion der Anzahl der Matrixmultiplikationen auf das nötige Mindestmaß können alle Geometrieinformationen gleichzeitig mit nur drei Rechenschritten in die jeweilige Betrachtungsrichtung rotiert und anschließend projektiv transformiert werden. Bei den üblichen 20.000-50.000 Punkten zur Repräsentation der Lichtaustritts- und der Verdeckungsflächen einer einzelnen Leuchte und den mindestens zu untersuchenden 182 Betrachtungsrichtungen erweist sich dies als äußerst hilfreich, da die Berechnungszeit hier als Faktor nicht mehr zu vernachlässigen ist.

### 5.2.3 Positionierung der Daten über den Leuchtdichteverteilungen

Für die Auswertung der Leuchtdichteverteilungen ist es von fundamentaler Wichtigkeit, dass die für die Überlagerung genutzten Geometriedaten an der richtigen Stelle innerhalb der Leuchtdichtedaten liegen. Dafür ist es notwendig, dass sich die Koordinatenursprünge des Goniometers und der Geometriedaten decken. Gerade für zunehmende seitliche Betrachtungsrichtungen erfolgt sonst eine Fehlpositionierung der Geometriedaten und damit eine Fehlbestimmung der leuchtenden Flächen innerhalb der Leuchtdichteverteilungen.



**Abbildung 5.8:** Auswirkungen eines falsch positionierten Koordinatenursprungs der Geometriedaten, am Beispiel eines von oben betrachteten, rotierten Objektes.

In Abbildung 5.8 ist skizzenhaft an einem von oben betrachteten hakenförmigen Objekt dargestellt, welche Auswirkungen unterschiedliche Positionen der Koordinatenursprünge haben können. Während sich die zwei Objekte bei 0° noch überlagern, liegen sie bei einer Drehung um 45° in positiver oder negativer Richtung überhaupt nicht mehr übereinander. In diesem Abschnitt wird eine Methode erläutert, welche den Koordinatenursprung der Geometriedaten am geometrischen Ort des Goniometerursprungs positioniert und außerdem eine Vielzahl weiterer bereits während der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Ausrichtung ermittelten Parameter optimiert. Im letzten Schritt wird außerdem der Messabstand genau bestimmt, der bisher, aufgrund



der fehlenden Möglichkeit zur präzisen Bestimmung des optischen Zentrums der Kamera, nur geschätzt werden konnte.

Zu Beginn werden die Geometriedaten für die neun relevanten Richtungen der Justagemessungen aus Tabelle 5.2 eingeladen und entsprechend der aktuellen Kameraparameter projektiv transformiert. Nicht berücksichtigt werden die Draufsicht (Tabelle 5.2, Nr. 1) und die Seitenansicht (Tabelle 5.2, Nr. 8), da die leuchtenden Flächen aus diesen Betrachtungsrichtungen häufig von Gehäusegeometrien verdeckt werden. Anschließend werden mithilfe eines variablen Schwellwertes die leuchtenden Flächen innerhalb der neun Leuchtdichteverteilungen gesucht. Dabei wird nach jeder Flächenbestimmung geprüft, ob die Anzahl der berücksichtigten Pixel annähernd der Anzahl der Pixel der projizierten Geometriedaten entspricht. Da die Ausrichtung automatisch erfolgt, ist über letzteres sichergestellt, dass die Software annähernd die korrekte leuchtende Fläche bestimmt hat.

Nun erfolgt die eigentliche Ausrichtung der leuchtenden Flächen aus den Geometriedaten über denen der aufgenommenen Leuchtdichteverteilungen. Als Maß für die Güte der Positionierung kommt der Korrelationskoeffizient nach Pearson zum Einsatz, der für zwei statistische Größen  $X$  und  $Y$  wie folgt definiert ist:

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)} \cdot \sqrt{\text{Var}(Y)}}. \quad (5.4)$$

$X$  und  $Y$  entsprechen im hier erläuterten Fall den geometrischen Positionen der Pixel der leuchtenden Flächen der Leuchtdichteverteilungen  $L'$  und der Geometriedaten  $M$  in binärer Darstellung nach Abschnitt 3.2.3. Wenn  $\rho = 1$  ist, besteht ein vollständiger Zusammenhang zwischen den überlagerten Flächen, das heißt, die leuchtenden Flächen aus den Leuchtdichtedaten und den Geometriedaten gleichen sich.

Die Ausrichtung ist in fünf Schritte unterteilt, die nacheinander, in genau der in Tabelle 5.5 gezeigten Reihenfolge, ausgeführt werden müssen.

**Tabelle 5.5:** Die fünf Schritte, die zur automatischen Positionierung der leuchtenden Flächen über den Leuchtdichteverteilungen nötig sind. Es werden die auszuwertenden Betrachtungsrichtungen und typische Intervallgrößen für die Optimierung gezeigt.

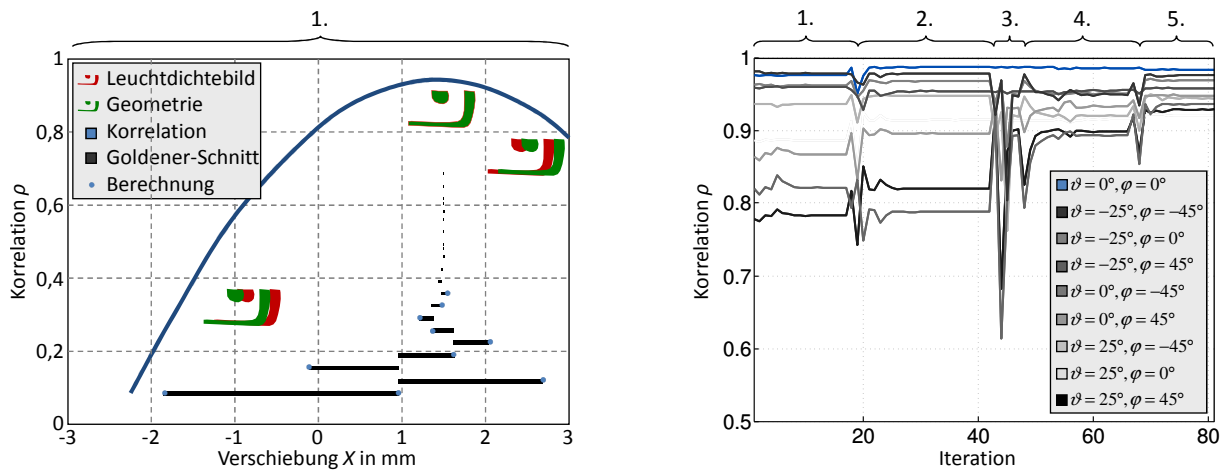
Schritt	zu optimierende Größe	auszuwertende Richtungen	Intervallgröße	Beschreibung
1	$X_{\text{geo}}$	$\vartheta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$	10 mm	hor. Positionierung der Daten
2	$Y_{\text{geo}}$	$\vartheta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$	10 mm	ver. Positionierung der Daten
3	$X_{\text{geo}} - u_0$	$\vartheta = 0^\circ, \varphi = \{-45^\circ, 45^\circ\}$	5 mm	hor. Positionierung des Drehpunktes
4	$Y_{\text{geo}} - v_0$	$\vartheta = \{-25^\circ, 25^\circ\}, \varphi = 0^\circ$	5 mm	ver. Positionierung des Drehpunktes
5	$Z_C$	$\vartheta = \{-25^\circ, 0^\circ, 25^\circ\}, \varphi = \{-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ\}$	20 mm	Bestimmung des Messabstandes

Anhand des ersten Schrittes soll hier das prinzipielle Vorgehen bei der Ausrichtung erläutert werden. Die Beschreibung kann im linken Diagramm der Abbildung 5.9 verfolgt werden. Im ersten Schritt der Ausrichtung wird die  $X$ -Position der Geometriedaten optimiert. Dazu ist eine einzelne Betrachtungsrichtung ausreichend, in diesem Fall  $\vartheta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$ , da aus weiteren Richtungen kein Mehrwert generiert wird. Die leuchtenden Flächen sind nach obiger Anleitung bereits aus den Leuchtdichteverteilungen extrahiert und stehen für die Berechnung zur Verfügung. Grundidee ist nun, dass in einem definierten Intervall, eine stückweise Verschiebung der Geometriedaten erfolgt und für jede Position der Korrelationskoeffizient bestimmt wird.

Im einfachsten Fall kann dies linear erfolgen. Dabei werden alle Positionen des Intervalls berechnet und anschließend die mit der höchsten Korrelation ausgewählt. Es ist jedoch meist so, dass über sehr wenige Berechnungen die Hauptrichtung der Suche nach dem Optimum errahnt werden kann und durch das lineare Vorgehen nur unnötig Zeit beansprucht wird [Men07]. Deswegen kommt hier ein Intervallhalbierungsverfahren zum Einsatz: die Goldene-Schnitt-Suche nach Kiefer [Kie53]. Bei diesem Verfahren wird ein Intervall genau an der Stelle der *Goldenen Zahl*

$$\Phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,618 \quad (5.5)$$

geteilt. Dann verhält sich der größere zum kleineren Teil des Intervalls genauso wie die ganze Strecke zum größeren Teil. Bei der Goldenen-Schnitt-Suche wird dieses Verhältnis in beide Richtungen des Intervalls berechnet und anschließend ein neues Intervall zwischen der Intervallgrenze und dem Schnittpunkt ausgewählt, welches den Schnittpunkt mit dem höheren Korrelationswert enthält. Vorteil dieses Vorgehens ist, dass nach der ersten Intervallberechnung für jede weitere Stufe der Suche nur noch ein einziges Mal die Korrelation bestimmt werden muss, weil die Intervallgrenzen jeweils schon in dem vorangegangenen Schritt berechnet wurden. Somit erfolgt eine deutlich effizientere Annäherung an das Optimum als bei linearer Suche.



**Abbildung 5.9:** links: Erläuterungen zur Goldenen-Schnitt-Suche am Beispiel der Verschiebung der Geometriedaten in X-Richtung und der Berechnung der Korrelation zwischen Leuchtdichteverteilung und Geometriedaten; rechts: Entwicklung der Korrelationskoeffizienten der neun Betrachtungsrichtungen über die fünf Schritte der Ausrichtung.

Sobald das Optimum für die X-Position bestimmt ist, wird die Prozedur im zweiten Schritt für die Y-Werte der Geometriedaten wiederholt. Im dritten und vierten Schritt der Ausrichtung wird der Nullpunkt der Geometriedaten mit dem Nullpunkt des Goniometerkoordinatensystems in Übereinstimmung gebracht. Dazu wird über den Zusammenhang:

$$u_0 \cdot \frac{f}{d_{\text{pixel}}} = \frac{X_{\text{geo}}}{r \cdot d_{\text{pixel}}} \cdot f, \quad (5.6)$$

welcher das Verhältnis zwischen den metrischen Strecken und der Abbildung in Sensorkoordinaten bei einem gegebenen Messabstand beschreibt, folgendes für  $u_0$  und äquivalent auch für  $v_0$  abgeleitet:

$$u_{0\text{opt}} = u_0 - \frac{X_{\text{geo}}}{r}, \quad v_{0\text{opt}} = v_0 - \frac{Y_{\text{geo}}}{r}. \quad (5.7)$$

Dadurch wird ein Zustand erreicht, bei dem sich die bereits ausgerichteten  $X$ - und  $Y$ -Positionen aller Geometriedaten nicht mehr verändern, sehr wohl aber der Koordinatenursprung der Daten. Dieser Teil der Ausrichtung adressiert somit das in Abbildung 5.8 gezeigte Problem. Für diese Teilschritte der Optimierung ist es selbstverständlich nicht mehr ausreichend, die Berechnung der Überlagerung aus nur einer einzigen Richtung durchzuführen. Deswegen werden für den horizontalen Nullpunkt die zwei Leuchtdichteverteilungen und zugehörigen Geometriedaten für  $\vartheta = 0^\circ$ ,  $\varphi = -45^\circ$  und  $\vartheta = 0^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  betrachtet und für den vertikalen entsprechend  $\vartheta = -25^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  und  $\vartheta = 25^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ .

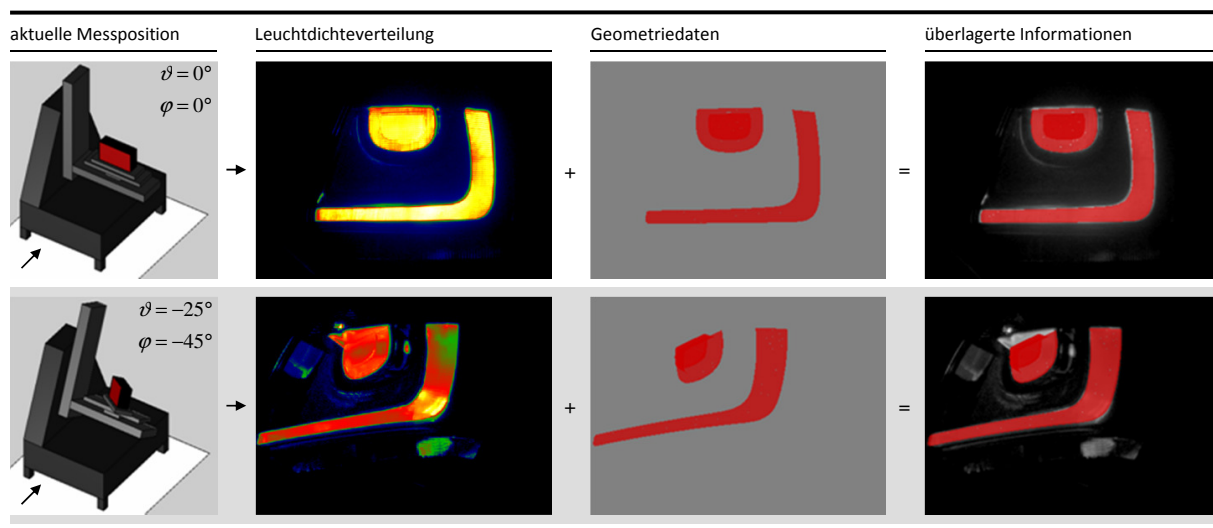
Im letzten Schritt wird der Messabstand  $r$  optimiert. Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 erläutert, lässt sich der Abstand zwischen Kamera und Objekt, aufgrund des variablen optischen Zentrums der Kamera nur sehr schwer bestimmen. Für diese Optimierung werden nun alle Ansichten der Justagemessungen für die Berechnung der Korrelation genutzt. Die Korrelationskoeffizienten für jede Betrachtungsrichtung werden quadratisch aufsummiert und die Summe wird während der Ausrichtung maximiert.

Im rechten Diagramm der Abbildung 5.9 ist die Entwicklung der einzelnen Korrelationskoeffizienten für alle Betrachtungsrichtungen über die fünf Teilschritte der Ausrichtung dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Ausrichtung bereits nach 80 Iterationen abgeschlossen ist. Die komplette Ausrichtung, mit Bestimmung der Leuchtdichteschwellwerte, der Transformation und Rotation der Geometriedaten und der Berechnungen der Korrelationskoeffizienten, beansprucht maximal 10 Minuten und erfolgt vollständig automatisiert. Aufgrund der Zerlegung der Ausrichtung in die fünf Teilschritte, erfolgt nur eine lokale Optimierung der Parameter. Das Aufteilen ist jedoch nötig, da eine gleichzeitige Optimierung aller Parameter, aufgrund des sich ergebenden sehr großen Parameterraumes, zu viel Zeit beanspruchen würde. Die schrittweise, lokale Optimierung ist dann hinreichend genau, wenn eine Komponentenausrichtung nach der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Methode durchgeführt wird. Nachdem die Ausrichtung abgeschlossen ist, kann die Bewertung aller Leuchtdichteverteilungen nach den in Abschnitt 5.3.4 vorgestellten Kriterien erfolgen.

Sollten einmal keine Geometriedaten vorliegen, kann das entwickelte Verfahren nicht eingesetzt werden, da für die Bewertung der Ort der leuchtenden Flächen bekannt sein muss. Zu diesem Zweck ist eine Methode zur Erzeugung von Geometriedaten auf Basis der gemessenen Leuchtdichteverteilungen entwickelt worden. Bei dieser Methode werden die Geometriedaten durch den Messtechniker direkt im projektiven Raum „gezeichnet“. Das Verfahren wird im Anhang B.2 ab Seite 135 beschrieben.

### 5.3 Auswertung der kombinierten Daten hinsichtlich der unterschiedlichen Kriterien

Nachdem die Leuchtdichteverteilungen gemessen, die Geometriedaten der sichtbaren leuchtenden Flächen bereitgestellt und entsprechend der Parameter der Leuchtdichtemesskamera projektiv transformiert sind, kann die Auswertung der Daten erfolgen. Abbildung 5.10 zeigt exemplarisch an zwei Betrachtungsrichtungen, wie die Geometriedaten für jede gemessene Richtung rotiert und transformiert werden und anschließend über den Lichtaustrittsflächen liegen.



**Abbildung 5.10:** Überlagerung der Leuchtdichteverteilungen mit den perspektivisch korrekt transformierten Geometriedaten der idealen leuchtenden Flächen aus zwei exemplarischen Betrachtungsrichtungen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Prozessschritte der Auswertung, zwei Methoden zur Visualisierung von Leuchtdichteverteilungen und das Programm zur Anzeige der Ergebnisverteilungen näher erläutert. Im Anschluss daran werden alle abgeprüften Kriterien näher erläutert und die zugehörigen Ergebnisverteilungen aufgezeigt.

### 5.3.1 Programmablauf

Das *MATLAB*-Berechnungsmodul besteht aus nachfolgend genannten Komponenten, die sich in eine Datenvorverarbeitung, die Datenverarbeitung und die Datennachbearbeitung unterteilen lassen.

#### Datenvorverarbeitung

Vor der Verarbeitung der Messdaten können verschiedene Einstellungen festgelegt werden, wie beispielsweise der auszuwertende Messbereich und die -auflösung. Hierbei ist darauf zu achten, dass zu den getroffenen Einstellungen Leuchtdichteverteilungen vorliegen. Des Weiteren müssen die Ablageverzeichnisse der Leuchtdichteverteilungen und der Geometriedaten angegeben werden. Es existieren außerdem Eingabefelder für die Kameraparameter und das Verzeichnis für die Ergebnisse. Es kann festgelegt werden, ob die Leuchtdichteverteilungen bereits während der Auswertung für eine spätere Verwendung in einem Bildbetrachter aufbereitet und als Bilder abgespeichert werden sollen. Wenn dies der Fall ist, müssen auch hier die zugehörigen Parameter, wie die Skalierungsmethode für die Leuchtdichten und das Datenformat, eingegeben werden.

Wenn alle Einstellungen vorgenommen sind, werden die Geometriedaten in den Arbeitsspeicher geladen, damit während der Auswertung eine schnellere Verarbeitung erfolgen kann. Anschließend startet die Auswertung. Für jedes während der Auswertung betrachtete Bewertungs-

kriterium wird eine Ergebnisverteilung angelegt, die während der Datenverarbeitung mit den entsprechenden Werten gefüllt wird.

### **Datenverarbeitung**

Während der Datenverarbeitung werden alle Betrachtungsrichtungen innerhalb des definierten Messbereichs nacheinander ausgewertet. Dazu wird zuerst die Leuchtdichteverteilung, die zum gewählten Winkel gehört, in das Programm geladen. Anschließend werden die Geometriedaten an die entsprechende Stelle rotiert und transformiert und daraus die binäre Maskierung erzeugt. Jetzt folgt die Auswertung nach den einzelnen Kriterien, wie dem Variationskoeffizient oder der mittleren Leuchtdichte, die im nächsten Abschnitt im Detail erläutert werden. Die Ergebnisse aller Bewertungen werden in den zugehörigen Ergebnisverteilungen eingetragen.

Wenn während der Vorverarbeitung festgelegt wurde, dass aus den Leuchtdichteverteilungen Bilder erzeugt werden sollen, erfolgt jetzt die Umrechnung der Leuchtdichteverteilungen entsprechend der gewählten Einstellungen. Diese werden im nächsten Abschnitt näher erläutert. Das gerade beschriebene Vorgehen wird für alle Betrachtungsrichtungen durchgeführt.

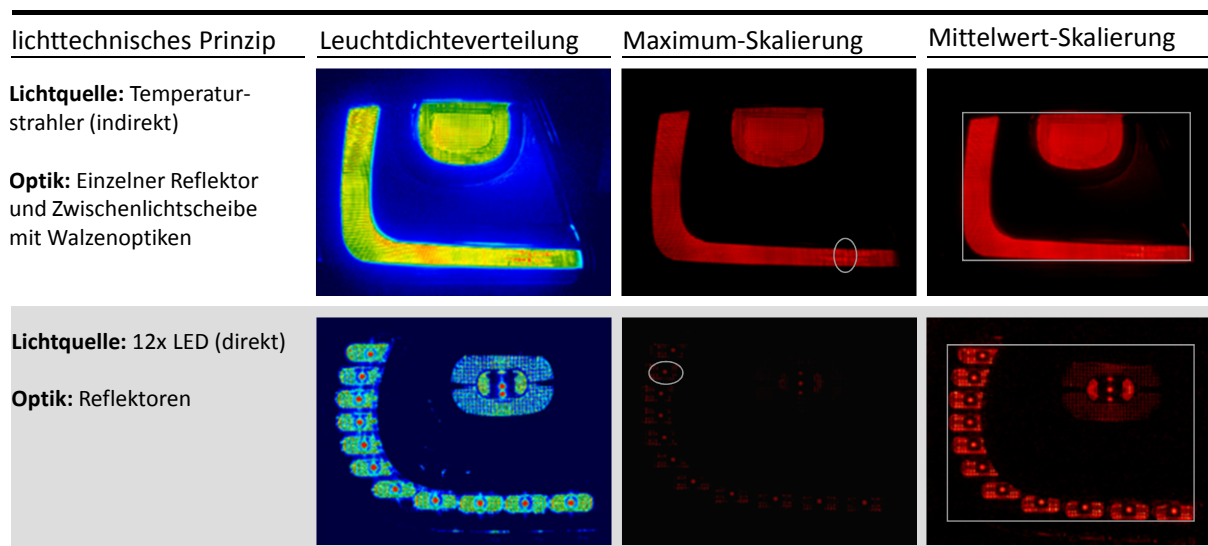
### **Datennachbearbeitung**

Nachdem alle Leuchtdichteverteilungen des ausgewählten Messbereichs verarbeitet sind und damit alle Ergebnisverteilungen an allen Stellen Werte enthalten, werden diese zur Kontrolle ausgegeben und im Ergebnisverzeichnis abgespeichert. Die Auswertung der beispielsweise 182 Betrachtungsrichtungen benötigt ungefähr 15 Minuten und erfolgt vollständig automatisiert. Sollten während der Auswertung Fehler aufgetreten sein, wird außerdem ein Fehlerprotokoll ausgegeben. Dies passiert immer dann, wenn zu einer auszuwertenden Betrachtungsrichtung kein Leuchtdichtebild vorliegt. Das Programm ist so ausgelegt, dass dann kein Abbruch erfolgt, sondern innerhalb der vorhandenen Leuchtdichteverteilungen diejenige ausgewählt wird, die der geforderten Richtung am ehesten entspricht. Im Protokoll werden dann die jeweils gewünschte und die tatsächlich genutzte Betrachtungsrichtung gespeichert.

### **5.3.2 Visualisierung der Leuchtdichteverteilungen**

Wie in Abschnitt 5.1 dieses Kapitels erläutert, werden während einer Leuchtenmessung eine Vielzahl von Leuchtdichteverteilungen aufgenommen. Diese können nicht nur zur Bewertung der Gleichmäßigkeit genutzt werden, sondern bei geeigneter Bearbeitung auch zur Visualisierung der Helligkeitsverteilung. So kann eine qualitative Beurteilung einer Leuchte aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen am Bildschirm erfolgen. Beispielsweise werden die Leuchtdichteverteilungen eines Schlusslichtes mithilfe einer roten Farbskala dargestellt. In Tabelle 5.1 wurde auf den hohen Dynamikumfang der Leuchtdichteverteilungen hingewiesen. Eine weitere Aufgabe bei der Erstellung einer Visualisierung aus Leuchtdichtedaten besteht darin, den Dynamikumfang soweit zu reduzieren, dass eine Darstellung der Leuchtdichteverteilungen am Bildschirm erfolgen kann, die Methode einfach und reproduzierbar ist, aber trotzdem die wesentlichen Aspekte der Wahrnehmung des Menschen berücksichtigt. Eigene Untersuchungen dazu ergaben eine logarithmische Bewertung der Leuchtdichten einer Schlussleuchte in

einem differenzierbaren Bereich von drei Dekaden [KRM<sup>+</sup>10]. In die Auswertesoftware sind zwei Visualisierungsmethoden integriert, welche die Ergebnisse der Untersuchungen nutzen. Die zwei Methoden sind in Abbildung 5.11 anhand zweier unterschiedlicher lichttechnischer Konzepte gezeigt.



**Abbildung 5.11:** Gegenüberstellung der zwei Visualisierungsmethoden anhand von zwei unterschiedlichen Leuchten. Bei der Maximum-Skalierung ist der gefundene Maximalwert der Leuchtdichte und bei der Mittelwert-Skalierung das für die Berechnung genutzte kleinste umschließende Rechteck eingezeichnet.

### Maximum-Skalierung

Die *Maximum-Skalierung* ist an die Spotmessung der Fotografie angelehnt. Allerdings wird hier nicht in einem kleinen Messfeld in der Mitte des Sensors gemessen, wie es bei den meisten Fotoapparaten üblich ist, sondern es wird explizit der hellste Wert im Bild genutzt. Anschließend wird der Leuchtdichtewert berechnet, der genau drei Dekaden niedriger als der Maximalwert ist. Alle Werte die unterhalb liegen, werden auf diesen Wert angehoben. Im letzten Schritt erfolgt eine Logarithmierung aller Werte und die Darstellung dieser, mit einer roten Farbskala. Die gezeigte Berechnungsmethode ist einfach und kann auf beliebige Leuchten angewendet werden. Wie jedoch auch der Abbildung zu entnehmen ist, existieren lichttechnische Konzepte, die sich für diese Methode nicht eignen. Dies ist auf die hohen maximalen Leuchtdichten zurückzuführen, wie sie typischerweise bei direkt abstrahlenden LED oder beim Blick direkt auf die Glühwendel der Lichtquelle vorliegen. In diesem Fall müsste eine Verschiebung der drei Dekaden zu niedrigeren Leuchtdichten erfolgen. Der nötige Faktor müsste von Darstellung zu Darstellung neu ermittelt werden, was bei der Vielzahl der Leuchtdichteverteilungen äußerst aufwendig und wenig reproduzierbar ist.

### Mittelwert-Skalierung

Für diesen Zweck wurde die *Mittelwert-Skalierung* entwickelt, die sich eher an der Integralmessung eines Fotoapparates orientiert. Die Grundidee besteht darin, dass der maßgebliche

Einflussfaktor bei der Wahrnehmung einer Leuchte die Adaptation des Betrachters ist, und dass diese bei der Darstellung der Leuchte mit berücksichtigt werden sollte. Die drei Dekaden der dargestellten Leuchtdichten sollten sich nach Abbildung 2.7 auf Seite 28 hälftig um die logarithmierte Adaptationsleuchtdichte aufspannen, um eine gute Bewertung zu ermöglichen. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass bei fovealer Betrachtung einer Leuchte die Leuchtdichten der Leuchte selbst maßgeblich die Adaptationsleuchtdichte bestimmen [KRM<sup>+</sup>10]. Des Weiteren ergaben die Untersuchungen, dass für die Bestimmung der Adaptationsleuchtdichte die mittlere logarithmierte Leuchtdichte des kleinsten, alle beteiligten leuchtenden Flächen umschließenden Rechtecks bestimmt werden muss. Um den ermittelten Wert werden anschließend hälftig die drei Dekaden gelegt. Das heißt, größere Werte werden auf den ermittelten Maximalwert gesetzt, kleinere auf den Minimalwert. Abschließend erfolgt die Darstellung der Leuchtdichteinformationen mit einer roten Farbskala.

Die zweite Methode ist wesentlich unsensibler gegenüber den Einflüssen des lichttechnischen Konzeptes der darzustellenden Leuchten, allerdings ist die Bestimmung des Rechtecks nicht trivial. Beide Visualisierungsmethoden sind in die Auswertesoftware integriert.

Durch die Visualisierungsmethoden ergibt sich die Möglichkeit, während der Betrachtung der Ergebnisverteilung eines ausgewählten Bewertungskriteriums, die zu einer Betrachtungsrichtung gehörige Leuchtdichteverteilung direkt mit anzuzeigen. Die Auswertesoftware wird im folgenden Abschnitt erläutert.

### 5.3.3 Darstellung der Ergebnisse

Nachdem eine Leuchte erfolgreich gemessen und eine Bewertung durchgeführt wurde, besteht eine weitere Anforderung in der einfachen Darstellung der Ergebnisse. Ein Mittel dazu stellen die bereits in Abschnitt 3.2.2 auf Seite 51 vorgestellten zweidimensionalen Ergebnisverteilungen dar. Insofern die Rohdaten, also die aufgenommenen Leuchtdichteverteilungen, noch zur Verfügung stehen, können auch diese in die Auswertung integriert werden. Das Vorgehen gestaltet sich dabei derart, dass innerhalb der Ergebnisverteilung ein Wert, und damit der zugehörige horizontale und vertikale Betrachtungswinkel, ausgewählt werden kann und in einem zweiten Fenster die mit diesem Winkel verknüpfte Leuchtdichteverteilung angezeigt wird. Die Leuchtdichteverteilung wird dann entweder genauso wie die Ergebnisverteilung in einer Falschfarbenskala oder mit einer der im letzten Abschnitt vorgestellten Visualisierungsmethoden dargestellt. Die Kombination aus einer Ergebnisverteilung und der zum ausgewählten Winkel gehörigen Leuchtdichteverteilung soll dem Lichttechniker eine einfache Möglichkeit bieten, schnell Problemstellen einer Leuchte zu identifizieren. In Abbildung 5.12 ist die Benutzeroberfläche der *MATLAB*-Auswertesoftware zur Anzeige der Ergebnisverteilungen dargestellt. Die Abbildung zeigt die betrachtungsrichtungsabhängige Ergebnisverteilung der *maximalen reflektierten Leuchtdichte* und eine Detaildarstellung der Leuchtdichteverteilung, welche einen hohen Wert für dieses Kriterium enthält. In der Falschfarbendarstellung ist eindeutig zu erkennen, dass die hohen Leuchtdichtewerte Reflektionen auf einer Blende der oberhalb liegenden kleinen runden leuchtenden Fläche sind.

Die Auswertesoftware bietet außerdem die Möglichkeit, die Geometriedaten für die ausgewählte Betrachtungsrichtung perspektivisch projiziert über der Leuchtdichteverteilung anzuzeigen. Dadurch werden, gerade für das gezeigte Kriterium, die reflektierten Leuchtdichten noch deutlicher erkennbar. Sollte eine Leuchte mit mehr als einer leuchtenden Fläche gemessen worden

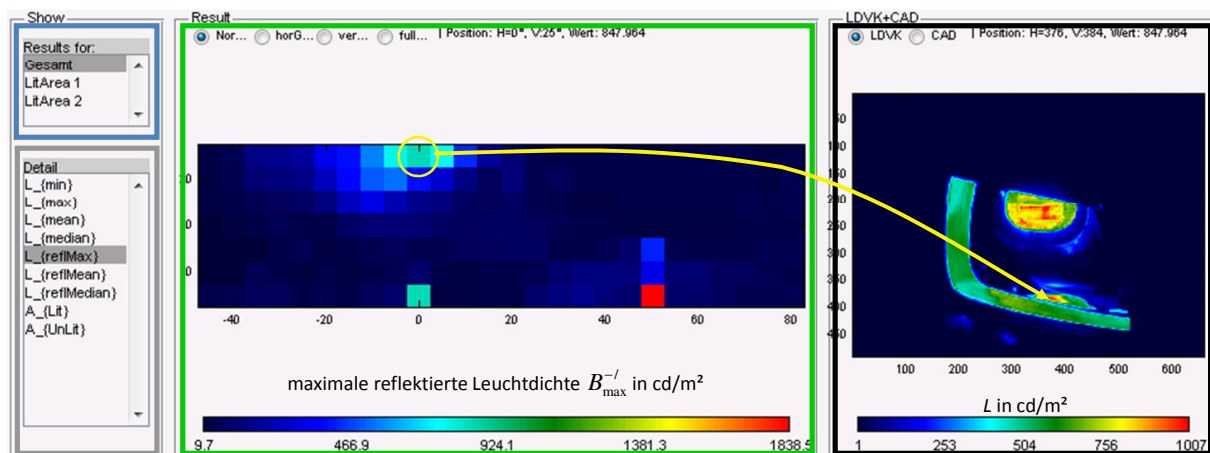


Abbildung 5.12: Benutzeroberfläche der Auswertesoftware mit

- ☐ ...Auswahlmenü für die Lichtaustrittsfläche(n),
- ☐ ...Auswahlmenü für das aktuell betrachtete Bewertungskriterium,
- ☐ ...Anzeige der ausgewählten Ergebnisverteilung des aktuellen Kriteriums und
- ☐ ...Anzeige der zugehörigen Leuchtdichteverteilung und/oder der Geometriedaten.

sein, kann während der Auswertung ausgewählt werden, welche der leuchtenden Flächen betrachtet werden. Die Berechnung der Ergebnisverteilungen erfolgt dann für alle ausgewählten Flächen und alle möglichen Kombinationen aller Flächen.

Im nächsten Abschnitt werden alle in der Auswertesoftware integrierten Bewertungskriterien erläutert.

### 5.3.4 Erläuterungen zu den einzelnen Kriterien

Nachfolgend werden die einzelnen Kriterien, die zugehörigen Berechnungen und jeweils eine Ergebnisverteilung gezeigt. Die Kriterien werden dabei in drei Kategorien unterschieden, die sich aus der Art der Auswertung ergeben:

1. Kriterien für die vollständige Leuchtdichteverteilung
2. Kriterien für die einzelne leuchtende Fläche
3. Kombination der Ergebnisverteilungen der einzelnen leuchtenden Flächen

Die erste Kategorie bezieht sich auf die vollständige Leuchtdichteverteilung. Alle Kriterien sind von der Anzahl der leuchtenden Flächen unabhängig und lassen sich zum Teil auch ohne vorliegende Geometriedaten berechnen. In der zweiten Kategorie befinden sich die Kriterien, die allen leuchtenden Flächen oder jeweils nur einer einzigen leuchtenden Fläche zugeordnet werden. Die dritte Kategorie enthält die Kriterien, die sich aus der Verrechnung der Ergebnisse aus der vorangegangenen Kategorie ergeben. Die dritte Kategorie existiert also immer nur dann, wenn mehr als eine leuchtende Fläche innerhalb der Leuchtdichteverteilungen existiert.

Für das Verständnis der nachfolgenden Erläuterungen seien hiermit noch einige Definitionen zur Beschreibung der Leuchtdichteverteilungen aus den unterschiedlichen Betrachtungsrichtun-



gen getroffen. Wie auch schon in Abschnitt 2.6 auf Seite 38 erläutert, werden die gemessenen Leuchtdichteverteilungen innerhalb der Arbeit in folgender Form mathematisch dargestellt:

$$L_{\vartheta,\varphi}(u, v) \in \mathbb{R}_+ \text{ mit } u, v \in \mathbb{N} \text{ und } \vartheta, \varphi \in \mathbb{R}.$$

Dabei entsprechen  $u$  und  $v$  einem Punkt innerhalb der Leuchtdichteverteilung und  $\vartheta$  und  $\varphi$  beschreiben die jeweilige Betrachtungsrichtung. Die Leuchtdichteverteilung wird durch eine  $S_L \times Z_L$  große Matrix repräsentiert. Der Spaltenindex  $u$  läuft von 0 bis  $S_L - 1$ , der Zeilenindex  $v$  von 0 bis  $Z_L - 1$ . Die jeweils aus der Leuchtdichteverteilung einer bestimmten Betrachtungsrichtung ermittelten Werte der einzelnen Untersuchungskriterien lassen sich in eine zweidimensionale Ergebnisverteilung  $B$  der Größe  $Z_B \times S_B$  einsortieren, die folgendermaßen definiert ist:

$$B(\vartheta, \varphi) \in \mathbb{R}_+ \text{ mit } \vartheta, \varphi \in \mathbb{R}.$$

Die Spalten laufen von 0 bis  $S_B - 1$ , was den horizontalen Betrachterwinkeln  $\varphi_{\min}$  bis  $\varphi_{\max}$  bei zugehöriger Schrittweite  $\varphi_{\text{step}}$  entspricht. Die Zeilen laufen von 0 bis  $Z_B - 1$ , was wiederum den vertikalen Betrachtungswinkeln  $\vartheta_{\min}$  bis  $\vartheta_{\max}$  bei Schrittweite  $\vartheta_{\text{step}}$  entspricht.

Es folgen die Erläuterungen zu den einzelnen Kriterien der drei Kategorien.

### Kategorie 1: Kriterien für die vollständige Leuchtdichteverteilung

In Abbildung 5.13 werden die als sinnvoll erachteten Bewertungskriterien für die vollständigen Leuchtdichteverteilungen vorgestellt. Die einzelnen Kriterien werden anschließend näher erläutert.

Nr.	Name	Zeichen	Verteilung
a)	maximale Leuchtdichte	$B_{\max}$ in $\text{cd/m}^2$	
b)	mittlere Leuchtdichte	$B_{\text{mean}}$ in $\text{cd/m}^2$	
c)	Größe der Lichtaustrittsfläche(n)	$B_A$ in $\text{mm}^2$	
d)	Größe der verdeckten Lichtaustrittsfläche(n)	$B_{A_e}$ in $\text{mm}^2$	
e)	maximale reflektierte Leuchtdichte	$B_{\max}^{-/}$ in $\text{cd/m}^2$	

**Abbildung 5.13:** Kriterien, die auf die komplette Leuchtdichteverteilung angewendet werden, unabhängig davon, wie viele leuchtende Flächen zur Verfügung stehen.

Die Ergebnisverteilung  $B_{\max}$  gibt Auskunft darüber, wie hoch die *maximale Leuchtdichte* (Abb. 5.13, a) in jede Betrachtungsrichtung ist:

$$B_{\max}(\vartheta, \varphi) = \max_L(L_{\vartheta,\varphi}(u, v)). \quad (5.8)$$

Aus der Ergebnisverteilung kann abgelesen werden, ob in einer einzelnen Richtung ein besonders hoher Maximalwert existiert, was beispielsweise auf eine Wendeldirekteinsicht hindeutet.

Die *mittleren Leuchtdichten* (Abb. 5.13, b) geben einen guten Überblick über die wahrgenommene Gesamthelligkeit der Leuchte durch den Betrachter. Zur Bestimmung der mittleren Leuchtdichte  $\bar{L}$  wird Gleichung (3.11) genutzt. Die Ergebnisse für jede Betrachtungsrichtung werden in der Ergebnisverteilung  $B_{\text{mean}}$  eingetragen:

$$B_{\text{mean}}(\vartheta, \varphi) = \bar{L}_{\vartheta, \varphi}. \quad (5.9)$$

Ein weiteres Kriterium, für welches die Leuchtdichteverteilungen nicht benötigt werden, ist die projizierte Fläche der *Größe der Lichtaustrittsflächen* (Abb. 5.13, c) in Betrachtungsrichtung. Dazu werden alle  $i$  über Gleichung (3.1) erzeugten binären Masken  $M_{\text{lf}_i}$  der leuchtenden Flächen aus einer Betrachtungsrichtung zu einer Maske  $M$  zusammengefasst:

$$M_{\vartheta, \varphi}(u, v) = M_{\text{lf}_1} + M_{\text{lf}_2} + \dots + M_{\text{lf}_i}. \quad (5.10)$$

Anschließend wird die Summe der Pixel mit Wert 1 über folgende Gleichung ermittelt:

$$n_{\text{pixel}} = \sum_{u=0}^{S_L-1} \sum_{v=0}^{Z_L-1} M(u, v), \quad (5.11)$$

aus der dann die projizierte Fläche aus jeder Betrachtungsrichtung ermittelt werden kann:

$$A_{\vartheta, \varphi} = n_{\text{pixel}} \cdot \left( \frac{r \cdot d_{\text{pixel}}}{f} \right)^2. \quad (5.12)$$

Die Ergebnisverteilung ergibt sich zu:

$$B_A(\vartheta, \varphi) = A_{\vartheta, \varphi}. \quad (5.13)$$

In Abschnitt 5.2.1 wird gezeigt, dass für die Bestimmung der sichtbaren leuchtenden Flächen auch verdeckende Flächen innerhalb der Geometriedaten berücksichtigt werden. Diese Informationen können während der Auswertung ebenfalls betrachtet werden. Damit wird bestimmt, wie viel Fläche der leuchtenden Flächen aus der jeweiligen Betrachtungsrichtung gerade nicht zu erkennen ist, weil sie durch andere Teile der Leuchte verdeckt wird. Um die *Größe der verdeckten Lichtaustrittsflächen* (Abb. 5.13, d) zu ermitteln, muss die gerade erzeugte Maske  $M$  noch einmal erzeugt werden, diesmal jedoch ohne Berücksichtigung der verdeckenden Geometrien. Anschließend wird  $M$  von der neuen Maske abgezogen. Es folgt wieder eine Bestimmung der Pixelanzahl und eine Berechnung der Fläche. Die verdeckte Fläche in jeder Betrachtungsrichtung wird in der Ergebnisverteilung  $B_{A_c}$  gespeichert.

Die Maske  $M$  lässt sich noch für ein weiteres Kriterium benutzen. Dazu muss sie allerdings binär invertiert werden. Das heißt, aus jeder 0 wird eine 1 und umgekehrt. Die invertierte Maske  $M^{-'}$  ist wie folgt definiert:

$$M^{-'} = 1 - M. \quad (5.14)$$

Die Multiplikation der Leuchtdichteverteilung mit der invertierten Maske ergibt eine neue Verteilung, in welcher die Leuchtdichten der leuchtenden Flächen nicht mehr enthalten sind:

$$L_{\vartheta, \varphi}^{-'} = L_{\vartheta, \varphi} \cdot M_{\vartheta, \varphi}^{-'}. \quad (5.15)$$

Der Gleichung (5.8) entsprechend, kann aus der neuen Leuchtdichtevertellung wieder die maximale Leuchtdichte bestimmt werden:

$$B_{\max}^{-'} = \max_L(L_{\vartheta,\varphi}^{-'}(u, v)). \quad (5.16)$$

Diese liegt auf jeden Fall außerhalb der leuchtenden Fläche und wird als *maximale, reflektierte Leuchtdichte* (Abb. 5.13, e) bezeichnet. Sie stellt ein Maß für Leuchtdichtereaktionen an Designblenden in Betrachtungsrichtung dar. In Abbildung 5.12 ist eine solche Reflektion beispielhaft dargestellt.

## Kategorie 2: Kriterien für die einzelne leuchtende Fläche

In Abschnitt 3.2.3 auf Seite 52, wurde die Überlagerung der Leuchtdichtevertellung mit einer binären Maskierung  $M$  vorgestellt, in der die Ortsinformationen einer Lichtaustrittsfläche aus einer ausgewählten Betrachtungsrichtung verzeichnet sind. Für alle nachfolgenden Betrachtungen ist bereits von einer nach Gleichung (3.2) maskierten Leuchtdichtevertellung  $L'_{\vartheta,\varphi}(u, v)$  auszugehen. Selbstverständlich werden zur Berechnung, beispielsweise des Mittelwertes, auch nur noch die Pixel der Maskierung berücksichtigt. Es wird jedes Kriterium auf jede leuchtende Fläche und jede Betrachtungsrichtung angewendet. Die Ergebnisvertellungen werden mit einem Hochkomma gekennzeichnet. Wenn eine spezielle Fläche angesprochen wird, bekommt das Gleichungszeichen einen zusätzlichen Index lf, also beispielsweise  $B'_{\text{lf}_1}$ . Abbildung 5.14 zeigt alle untersuchten Kriterien und die zugehörigen Ergebnisvertellungen  $B'$  für beide leuchtenden Flächen des Messobjektes. Auf den Index zur Beschreibung der leuchtenden Fläche wird der Übersichtlichkeit wegen verzichtet.

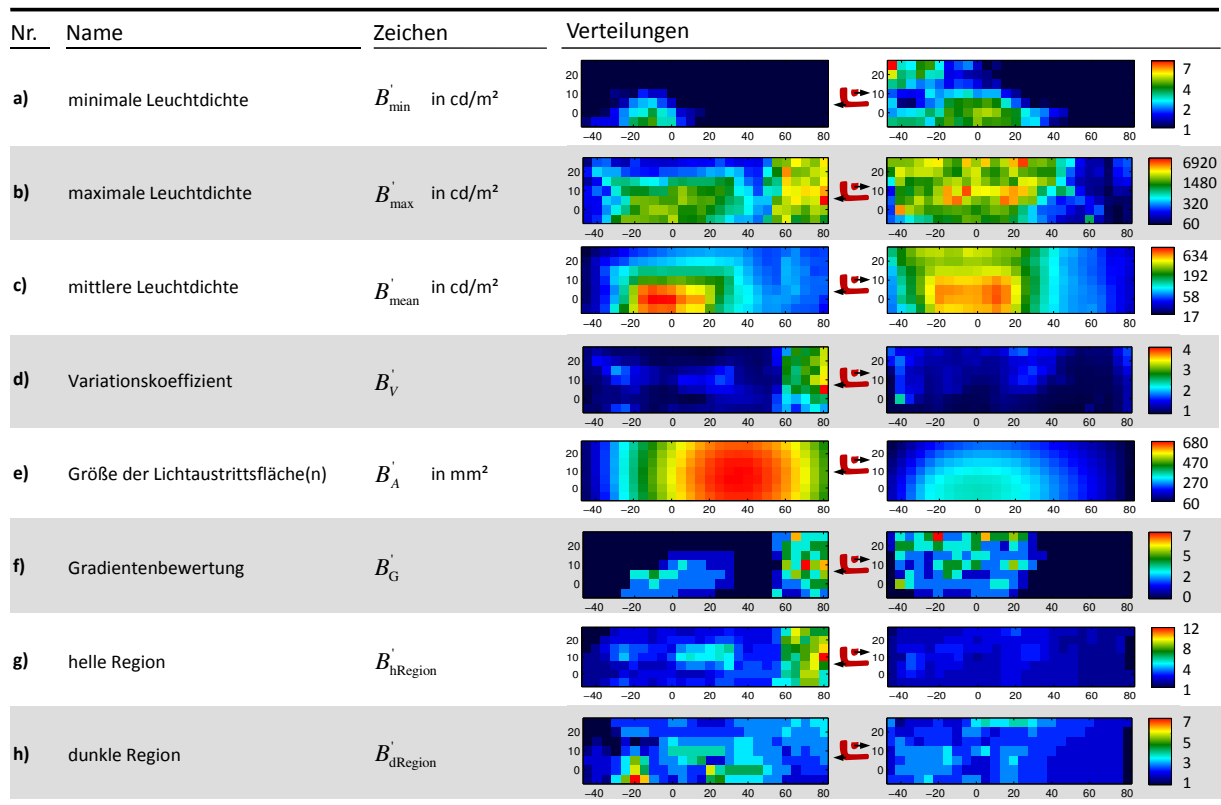
Bei dem ersten Kriterium handelt es sich um die *minimale Leuchtdichte* (Abb. 5.14, a) innerhalb einer leuchtenden Fläche. Die Ergebnisvertellung zeigt den jeweiligen Minimalwert der Leuchtdichte innerhalb der leuchtenden Fläche in die definierten Betrachtungsrichtungen:

$$B'_{\min}(\vartheta, \varphi) = \min_L(L'_{\vartheta,\varphi}(u, v)). \quad (5.17)$$

Die minimale Leuchtdichte stellt einen ersten Indikator für die Gleichmäßigkeit der leuchtenden Fläche dar. Je näher die minimale Leuchtdichte am Mittelwert der leuchtenden Fläche liegt, desto gleichmäßiger ist die Fläche. Ein sehr niedriger Wert könnte ein Indiz für einen dunklen Fleck oder eine dunkle Kante sein. In diesem Abschnitt werden dafür jedoch noch geeignetere Indikatoren vorgestellt. Das Gegenstück zur minimalen Leuchtdichte stellt die *maximale Leuchtdichte* (Abb. 5.14, b) dar. Die maximale Leuchtdichte gibt Hinweise auf helle Flecken oder eine Kante innerhalb der leuchtenden Fläche. Die Gleichung entspricht im Wesentlichen der des Minimums:

$$B'_{\max}(\vartheta, \varphi) = \max_L(L'_{\vartheta,\varphi}(u, v)). \quad (5.18)$$

Die *mittlere Leuchtdichte* (Abb. 5.14, c) der einzelnen leuchtenden Flächen zeigt an, wie sich der wahrgenommene Helligkeitseindruck der einzelnen leuchtenden Flächen aus den unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen zueinander verhält. Es kann abgelesen werden, ob alle leuchtenden Flächen eine ähnliche Verteilung und damit auch ein ähnliches Verhalten aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen aufweisen oder ob bestimmte leuchtende Flächen für ausgewählte Winkel der Lichtstärkeverteilung verantwortlich sind. Mithilfe der mittleren Leuchtdichte kann somit auch eine Analyse der Fernfeldverteilung erfolgen. Für die mittleren Leuchtdichten wird



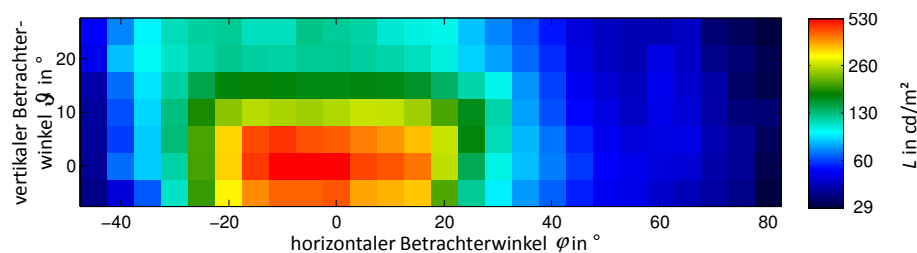
**Abbildung 5.14:** Kriterien, die auf alle vorhandenen Lichtaustrittsflächen einzeln angewendet werden. Die Ergebnisverteilungen sind pro Kriterium für beide leuchtenden Flächen jeweils auf das globale Maximum skaliert.

Gleichung (3.12) genutzt. Den Abbildungen in der Tabelle sind bereits die Betrachtungswinkel zu entnehmen, in denen die mittlere Leuchtdichte der zwei leuchtenden Flächen stark unterschiedlich ist.

Da für alle leuchtenden Flächen die mittleren Leuchtdichten bekannt sind, kann über nachfolgende Gleichung, auch die mittlere Leuchtdichte aller leuchtenden Flächen berechnet werden:

$$B'_{\text{mean}} = \frac{\sum_i B'_{\text{mean}_{\text{If}_i}} \cdot B'_{A_{\text{If}_i}}}{\sum_i B'_{A_{\text{If}_i}}} \quad (5.19)$$

Die Ergebnisverteilung dieser Berechnung ist in Abbildung 5.15 zu sehen.



**Abbildung 5.15:** Ergebnisverteilung der mittleren Leuchtdichten aller zwei leuchtenden Flächen der Testleuchte.

Die mittlere Leuchtdichte kann außerdem für das nächste Kriterium, den *Variationskoeffizient* (Abb. 5.14, d), genutzt werden, da sie hier für die Berechnung benötigt wird. Dieser hat sich als geeignetes Kriterium für die Gleichmäßigkeitsbewertung innerhalb einer leuchtenden Fläche erwiesen. Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 erläutert, berechnet er sich aus dem Quotienten der Standardabweichung und dem Mittelwert der Leuchtdichte nach Gleichung (3.8) für alle Betrachtungsrichtungen zu:

$$B'_V(\vartheta, \varphi) = V'_{\vartheta, \varphi}(u, v). \quad (5.20)$$

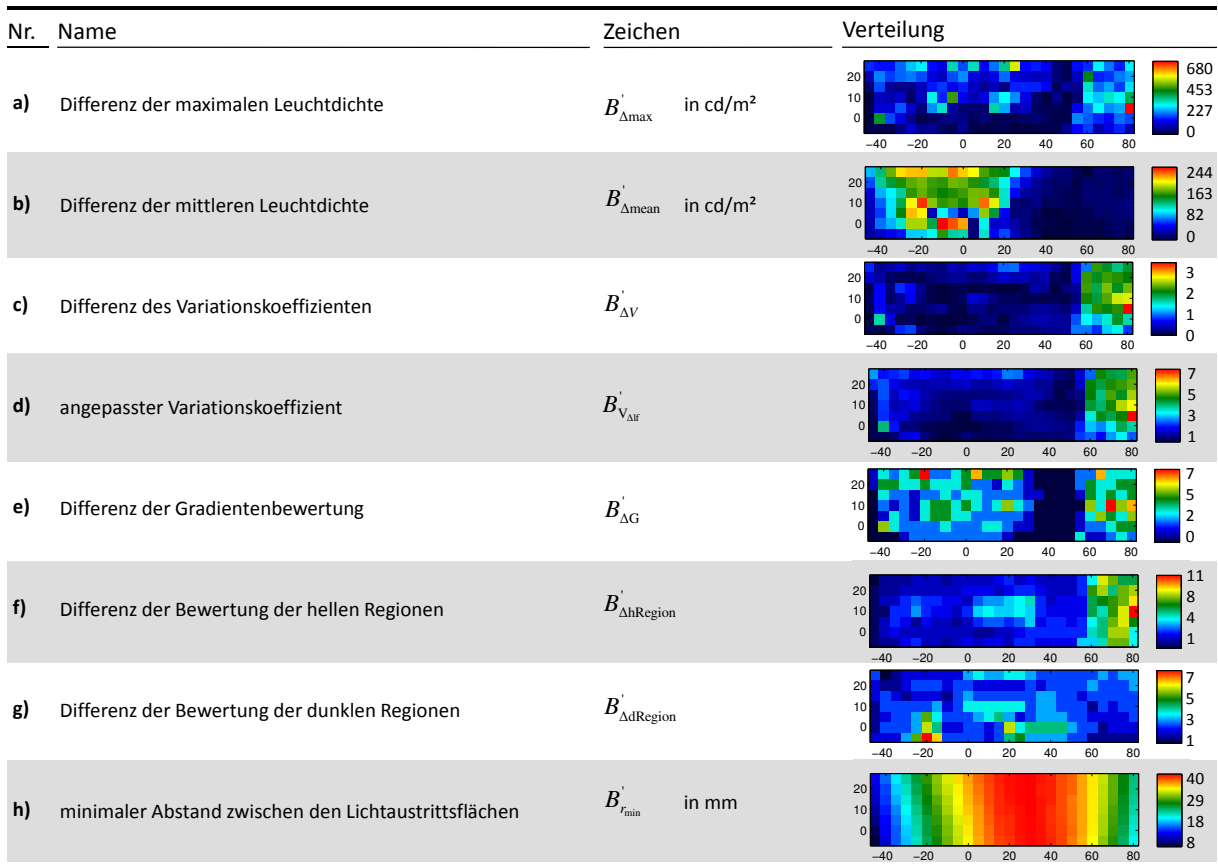
Die nächsten Ergebnisverteilungen zeigen die *Größe der einzelnen Lichtaustrittsfläche(n)* (Abb. 5.14, e). Die Berechnung entspricht den in Kategorie 1 in den Gleichungen (5.10) bis (5.12) gezeigten Vorgehen, nur eben für alle leuchtenden Flächen einzeln. Im Zusammenhang mit der bereits gezeigten mittleren Leuchtdichte der leuchtenden Fläche, lässt sich über das Umstellen von Gleichung (1.1) die abgegebene Lichtstärke der leuchtenden Fläche abschätzen. Eine zusätzliche Erkenntnis ist, dass sich die geometrische Größe der leuchtenden Fläche auch aus den CAD-Daten berechnen lässt. Der Quotient aus projizierter zu realer Fläche kann als Indikator für die Pfeilung der Leuchte, also die Schrägstellung der leuchtenden Flächen, angesehen werden.

Die letzten drei Kriterien entsprechen den Ergebnissen der Algorithmen für ausgewählte Kriterien, die in Abschnitt 3.3.1 vorgestellt wurden. Für die *Gradientenbewertung* (Abb. 5.14, f) ist dabei wichtig, dass die Maskierung mittels des Erosionsoperators ein wenig verkleinert wird, damit keine Bewertung der Umrandung der leuchtenden Fläche, sondern ausschließlich der Gradienten innerhalb der Fläche erfolgt. Alle drei Kriterien können unter definierten Messbedingungen, hier sei die Kameraauflösung als sensibelster Parameter genannt, genutzt werden. Das heißt, dass bei Vorgabe von Grenzwerten aus Ergebnissen einer Probandenstudie, Minimal- und Maximalwerte für die Kriterien festgelegt werden können. Ein weiterer sensibler Parameter, der über eine gesonderte Probandenstudie untersucht werden sollte, ist die minimale Größe einer zu beachtenden *hellen* (Abb. 5.14, g) oder *dunklen Region* (Abb. 5.14, h) innerhalb einer leuchtenden Fläche. Im hier gezeigten Fall wird eine Größe von  $25 \text{ mm}^2$  angenommen, da die mittels Software gefundenen Effekte so am ehesten den durch die Probanden angemerkten Effekten entsprechen.

### Kategorie 3: Kombination der Ergebnisverteilungen der einzelnen leuchtenden Flächen

Nachdem die Kriterien zur Bewertung vollständiger Leuchtdichteverteilungen und einzelner leuchtender Flächen gezeigt worden sind, wird nun eine dritte Kategorie eingeführt, deren Ergebnisse aus den bereits existierenden Ergebnisverteilungen berechnet werden. Die Berechnung der Ergebnisverteilungen erfolgt immer erst während der Darstellung in der Auswertesoftware, da erst innerhalb dieser bestimmt wird, welche leuchtenden Flächen gerade betrachtet werden. Dies ist wichtig, da für bestimmte Kriterien eine Betrachtung aller leuchtenden Flächen wenig sinnvoll ist.

Als eines der wichtigsten Ergebnisse sei hier die Differenz der mittleren Leuchtdichten von verschiedenen leuchtenden Flächen in die jeweilige Betrachtungsrichtung genannt. In Abbildung 5.16 sind einige Ergebnisse dieser Berechnungen gezeigt, die für den Entwicklungsprozess als sinnvoll erachtet werden.



**Abbildung 5.16:** Ausgewählte Kriterien, die sich aus den zuvor berechneten Ergebnisverteilungen ableiten lassen.

Die Ergebnisse werden erst zum Zeitpunkt der Betrachtung berechnet, da kein großer Aufwand in der Verrechnung von zwei Matrizen besteht und somit ein Freiheitsgrad gewonnen wird. Dem Anwender wird ermöglicht, explizit die auszuwertenden leuchtenden Flächen auszuwählen, was vor allem bei Leuchten, die aus sehr vielen einzelnen Lichtfunktionskammern bestehen, sinnvoll ist. Es können dann explizit die leuchtenden Flächen ausgewählt werden, die gerade von Interesse sind und andere können gezielt ignoriert werden. Außerdem kann jeweils entschieden werden, ob die Darstellung in relativer Form oder absolut erfolgen soll und ob der Betrag angezeigt wird oder ob Vorzeichentreue gilt. Es muss von Fall zu Fall entschieden werden, welche Berechnung sinnvoll ist.

Die *Differenz der maximalen Leuchtdichte* (Abb. 5.16, a) gibt Auskunft darüber, wie stark sich die maximalen Leuchtdichten der ausgewählten leuchtenden Flächen in die jeweilige Betrachtungsrichtung unterscheiden. Die Ergebnisverteilung wird in  $B'_{\Delta\max}$  gespeichert. Bisher wurde außerdem noch kein Maß für die Bewertung der mittleren Leuchtdichten der ausgewählten leuchtenden Flächen zueinander vorgestellt, wie es in Kapitel 3.3.2 angedacht wurde. Durch die Verrechnung der Teilergebnisverteilung kann dies nun nachgeholt werden. In der Ergebnisverteilung  $B'_{\Delta\text{mean}}$  wird dabei für jede Betrachtungsrichtung die *Differenz zwischen den mittleren Leuchtdichten der einzelnen leuchtenden Flächen* (Abb. 5.16, b)  $lf_1$  und  $lf_2$  berechnet:

$$B'_{\Delta\text{mean}} = B'_{\text{mean}|f_1} - B'_{\text{mean}|f_2} . \quad (5.21)$$

Der Ergebnisverteilung kann entnommen werden, ob die leuchtenden Flächen eines Schlusslichtes aus seitlichen Betrachterwinkeln als nicht mehr leuchtend wahrgenommen werden, weil

die Differenz der mittleren Leuchtdichten zwischen den leuchtenden Flächen zu groß ist. Im Sinne einer hohen Güte oder Anmutungsqualität der Leuchte sollten sich alle leuchtenden Flächen bei Betrachtung aus unterschiedlichen Richtungen möglichst gleich verhalten. Dies kann für alle Ergebnisverteilungen gleichermaßen angewendet werden und gilt somit auch für den *Variationskoeffizient* (Abb. 5.16, c), die *Gradientenbewertung* (Abb. 5.16, e) und die Bewertung der *hellen* (Abb. 5.16, f) und *dunklen Regionen* (Abb. 5.16, g). Ein wenig speziell ist das Kriterium *angepasster Variationskoeffizient* (Abb. 5.16, d), welches ein Ergebnis der Probandenuntersuchungen darstellt. Es handelt sich um den Variationskoeffizient aller leuchtender Flächen addiert mit der Differenz der einzelnen leuchtenden Flächen, nach Gleichung (4.2). Die Details zur Berechnung dieses speziellen Kriteriums sind in Anhang B.6 ab Seite 141 zu finden.

Das letzte Kriterium ist der bereits in Kapitel 3.2.4 auf Seite 53 beschriebene *minimale Abstand zwischen den Lichtaustrittsflächen* (Abb. 5.16, h) auf Basis der minimalen euklidischen Distanz zwischen den Rändern der Lichtaustrittsflächen. Die Angaben innerhalb der Ergebnisverteilung entsprechen dabei der Länge der projizierten Strecke zwischen den leuchtenden Flächen in mm. Der Ergebnisverteilung kann entnommen werden, bis zu welchem horizontalen oder vertikalen Betrachtungswinkel die ausgewählten leuchtenden Flächen noch geometrisch voneinander getrennt sind. Wie bereits in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, kann innerhalb der Software ausgewählt werden, welche und auch wie viele leuchtende Flächen gerade ausgewertet werden sollen. Sollten bei der Berechnung des minimalen Abstandes mehr als zwei Flächen betrachtet werden, wird in der Ergebnisverteilung nur der jeweils kleinste Abstand angegeben. Für die übrigen Kriterien, wird unabhängig von der Anzahl der ausgewählten Flächen jeweils die maximale Differenz bestimmt. Anstelle der maximalen Differenz könnte die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient zwischen den ausgewählten leuchtenden Flächen als Maß für Abweichung bestimmt werden. Dies wurde im Rahmen der Arbeit jedoch nicht näher untersucht.

## 5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden das aufgebaute Messsystem und dessen Verwendung erläutert. Dabei wird speziell auf die Ausrichtung der einzelnen Komponenten zueinander eingegangen, da eine korrekte Auswertung der aufgenommen Leuchtdichteverteilungen auf Basis von Geometriedaten nur möglich ist, wenn die Orientierung der Kamera zum Messobjekt und damit zum Goniometer hinreichend genau beschrieben werden kann.

Um eine Bewertung der Gleichmäßigkeit einer leuchtenden Fläche vornehmen zu können, muss der Software bekannt sein, wo sich innerhalb der Leuchtdichteverteilung eine leuchtende Fläche befindet. Die zu bewertende leuchtende Fläche händisch festzulegen ist prinzipiell möglich. Ein maßgeblicher Anteil des neuen Bewertungsverfahrens ist jedoch, eine Leuchte aus sehr vielen Betrachtungsrichtungen zu bewerten, da die meisten Kfz-Leuchten eine über die Veränderung der Betrachtungsrichtung ebenfalls stark variierende Leuchtdichteverteilung aufweisen. Für sehr viele Leuchtdichteverteilungen ist es nicht mehr praktikabel, die leuchtenden Flächen händisch einzuzichnen. Die leuchtende Fläche über einen Schwellwert direkt in den Leuchtdichteverteilungen zu bestimmen ist auch nicht möglich, da dadurch dunkle Bereiche innerhalb einer leuchtenden Fläche nicht mit berücksichtigt werden, obwohl diese genau diejenigen Effekte sind, die eigentlich gefunden und bewertet werden sollen. Für das neue Messsystem wurde

deshalb eine Methode integriert, welche auf Basis von CAD-Daten der Leuchte und den Möglichkeiten der perspektivischen Projektion eine Maskierung der leuchtenden Flächen innerhalb aller Leuchtdichteverteilungen vornimmt. Dabei wurde auch darauf geachtet, dass Teile der leuchtenden Flächen aus bestimmten Betrachtungsrichtungen aufgrund von verdeckenden Geometrien nicht zu sehen sind, was im Gegensatz zu den zuvor genannten dunklen Bereichen innerhalb der leuchtenden Flächen nicht mit bewertet werden soll.

Durch die Verwendung von Geometriedaten und der sich daraus ergebenden erweiterten Kenntnis über die Inhalte der Leuchtdichteverteilung kann mithilfe eines im Detail vorgestellten Optimierungsalgorithmus die Ausrichtung der Komponenten softwareseitig deutlich verbessert und damit die Güte der Bewertung noch erhöht werden.

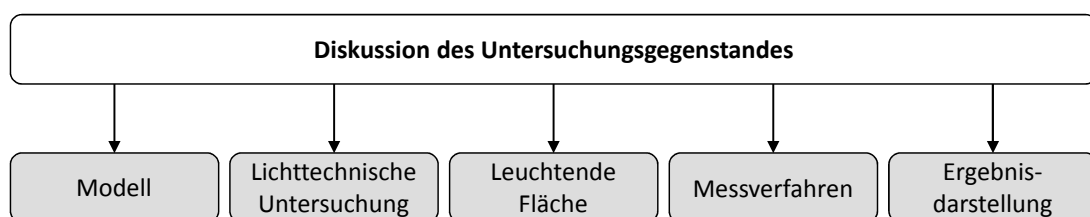
Abschließend werden die Auswertesoftware und deren Möglichkeit zur Darstellung der Leuchtdichteverteilungen vorgestellt. Die Software bietet nicht nur die Möglichkeit die Ergebnisverteilungen der Bewertungskriterien anzuzeigen, sondern bei Auswahl eines Betrachtungswinkels die entsprechende Leuchtdichteverteilung darzustellen. Dies erhöht die Aussagekraft der übersichtlichen Ergebnisverteilungen zusätzlich. Für die Darstellung der Leuchtdichteverteilungen werden zwei Visualisierungsmethoden erläutert.





## 6 Diskussion

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der einzelnen Aufgaben des Untersuchungsgegenstandes, die in Abschnitt 1.2 ab Seite 17 beschrieben sind, analysiert und die Ergebnisse kritisch diskutiert. Die in Abbildung 6.1 gezeigten Teilaspekte werden erörtert.



**Abbildung 6.1:** Die in diesem Abschnitt diskutierten Teilaspekte des Untersuchungsgegenstandes.

### 6.1 Modell zur Beschreibung und Bewertung der Gleichmäßigkeit

Den Hauptbestandteil des Untersuchungsgegenstandes der Arbeit stellt das Modell zur Bewertung der Gleichmäßigkeit dar. Hier besteht der Wunsch in der Ableitung einer möglichen Kennzahl zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit einer Schlussleuchte. Dies könnte zum Beispiel ein Verhältnis von akzeptierten Leuchtdichtewerten innerhalb der leuchtenden Fläche sein. Daraus ergibt sich die Frage, ob dieses definierte Verhältnis denn auch zwischen zwei leuchtenden Flächen der gleichen Lichtfunktion gilt und welche Leuchtdichten dabei eigentlich betrachtet werden müssen: maximale oder mittlere Leuchtdichten der vollständigen leuchtenden Flächen oder nur bestimmter Regionen?

Um diese Frage beantworten und gegebenenfalls eine Kennzahl ableiten zu können, erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Eigenschaft Gleichmäßigkeit und eine Analyse der Einflussfaktoren. Unter diesen ist vor allem der Betrachtungsabstand maßgeblich. Eine Beobachtung typischer Bewertungssituationen im Leuchtenentwicklungsprozess zeigt, dass sich je nach Betrachtungsabstand die Aufmerksamkeit des Betrachtenden verändert. Wie Tabelle 3.1 auf Seite 46 zeigt, werden bei einem geringen Betrachtungsabstand eher Ungleichmäßigkeiten innerhalb der leuchtenden Flächen identifiziert und angemerkt. Ist der Abstand dagegen sehr groß, sind vor allem die Helligkeitsunterschiede zwischen den leuchtenden Flächen von Interesse. Dafür kann die perspektivische Größenänderung der gesehenen Ungleichmäßigkeiten oder die individuelle Sehleistung verantwortlich sein, also nach Abbildung 2.8 auf Seite 30 elementare Funktionen, wie beispielsweise die Sehschärfe und die Kontrastempfindlichkeit und damit

deren Einflussfaktoren, wie die Sehobjektgröße oder die Objektleuchtdichte. Mit zunehmendem Abstand werden kontinuierlich immer mehr Regionen innerhalb der leuchtenden Flächen zusammengefasst und es findet eine Mittelung der Leuchtdichten statt.

Es lässt sich ableiten, dass die Vorgabe einer einzigen Kennzahl in Form eines zulässigen Verhältnisses von Leuchtdichteunterschieden zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit voraussichtlich nicht ausreicht. Ein solches Verhältnis kann vorgegeben werden, wenn die Randbedingungen wohl definiert und beherrschbar sind. Beispielsweise wird für die Gleichmäßigkeit der Helligkeit einer Tachonadel der Instrumententafel ein maximales Verhältnis vorgegeben. In diesem Anwendungsfall ist das möglich, weil die Größe der Tachonadel, der Betrachtungsabstand, die Aug- und Kameraposition, die Umgebungshelligkeit und die Auflösung des Messsystems eindeutig beschrieben sind. Für Signalleuchten lassen sich diese Randbedingungen aufgrund der Gestaltungsfreiheit und der verschiedenen Betrachtungsabstände und -richtungen nicht einfach festlegen. Ein definiertes Verhältnis zur Beschreibung der Gleichmäßigkeit wäre außerdem nur dann wirklich sinnvoll, wenn der Abstand zwischen den beschriebenen minimalen und maximalen Leuchtdichten, deren Ausdehnung und der Verlauf der Werte zwischen den Extrema berücksichtigt wird. Das heißt, dass auf jeden Fall die vorliegenden Gradienten mit berücksichtigt werden müssen. Abbildung 6.2 zeigt die Problematik skizzenhaft. Obwohl das gleiche Verhältnis zwischen Minimal- und Maximalwert existiert, wird eine Bewertung der Gleichmäßigkeit unterschiedliche Werte ergeben. Hierfür müssten eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt werden, um eventuell existente Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen nachzuweisen und ein Modell auszuarbeiten. Es wird vermutet, dass eine allgemeine Gültigkeit jedoch nur schwer zu erreichen ist.



**Abbildung 6.2:** *Zwei horizontale Balken, die links und rechts, jeweils die gleichen Extremwerte, dazwischen aber unterschiedliche Verläufe aufweisen.*

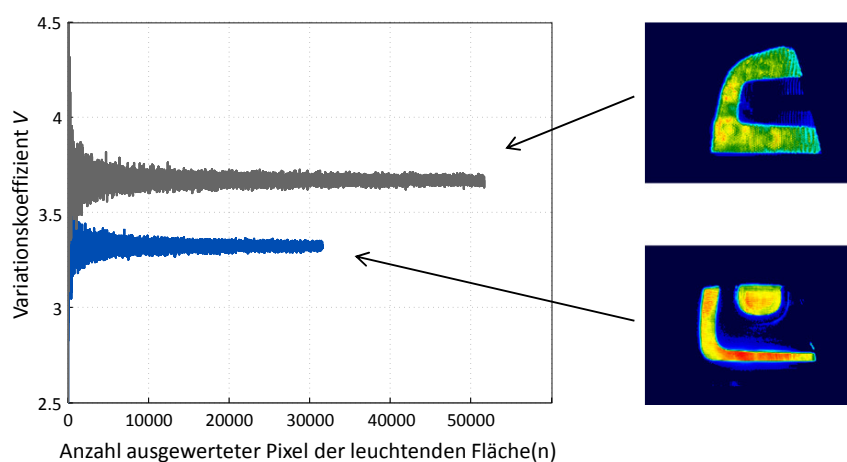
In dieser Arbeit erfolgt deshalb zu Beginn eine Aufteilung der Gleichmäßigkeitsbewertung in zwei, im Leuchtenentwicklungsprozess, relevante Ausprägungen. Zum einen die Gleichmäßigkeit der Helligkeiten zwischen unterschiedlichen leuchtenden Flächen und zum anderen die Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung innerhalb einer leuchtenden Fläche. Dazu sei gesagt, dass die Begutachtung einer Leuchte nach diesen zwei Ausprägungen immer im gerade sinnvollen Abstand erfolgt. Wenn Details bewertet werden, wird der Abstand zwischen Betrachter und Leuchte kurz gewählt ( $r < 3$  m). Sind die Helligkeitsunterschiede zwischen leuchtenden Flächen von Interesse, wird die Entfernung eher größer gewählt ( $3 \text{ m} < r < 25$  m). Außerdem ergab die Auswertung der lichttechnischen Untersuchung, dass es in bestimmten Fällen, zu einer Durchmischung der zwei untersuchten Ausprägungen kommen kann, was in Abschnitt 6.2 diskutiert wird. Die zwei Ausprägungen der Bewertung werden nachfolgend einzeln betrachtet.

### **Gleichmäßigkeit innerhalb einer leuchtenden Fläche**

Für die Gleichmäßigkeit innerhalb einer leuchtenden Fläche wird der Variationskoeffizient benutzt. Er entspricht dem Verhältnis aus Standardabweichung und Mittelwert der Leuchtdichte

einer betrachteten Region und wird bereits in anderen lichttechnischen Bewertungen in ähnlicher Form eingesetzt. Wie bereits in Abschnitt 3.3 ab Seite 54 beschrieben, entspricht die Bewertung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung eines Arbeitsplatzes nach Faktor  $g_3$  einer Bewertung mit dem Variationskoeffizient [DIN50358]. Bei dieser Methode wird die Anzahl der Messfelder auf 100 festgelegt. Dadurch wird ein großer Einflussfaktor auf den Wert des Variationskoeffizienten minimiert: die Abhängigkeit zur Messauflösung. Es kann ein Wert definiert werden, unterhalb dessen die Beleuchtung des Arbeitsplatzes als gleichmäßig angenommen wird.

Im Falle von Signalleuchten ist ein ähnliches Vorgehen nur schwer umsetzbar, da Form und Größe der leuchtenden Flächen und die geometrischen und optischen Eigenschaften zwischen den Leuchten unterschiedlicher Fahrzeuge stark voneinander abweichen. Es bedarf einer Methode zur genauen Bestimmung der zu bewertenden leuchtenden Fläche und es müsste ein geeignetes Vorgehen zur Beschreibung der Lage und Größe der Messfelder gefunden werden, damit eine eindeutige Messvorschrift angegeben werden kann. In Abbildung 6.3 ist exemplarisch das Konvergenzverhalten für die Variationskoeffizienten über die zufällige Auswertung von einem bis hin zu allen Pixeln der leuchtenden Fläche(n) zweier Leuchten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Variationskoeffizient bereits ab ungefähr der Hälfte aller Pixel der leuchtenden Flächen kaum noch abnimmt. Das legt die Vermutung nahe, dass nicht alle Pixel ausgewertet werden müssen. Es zeigt aber auch, dass beispielsweise 100 Pixel innerhalb der leuchtenden Flächen nicht ausreichen, da in diesem Bereich noch zu starke Schwankungen auftreten. Es ist zu erkennen, dass die Variationskoeffizienten gegen einen bestimmten Wert konvergieren. Die Unterschiede in den Variationskoeffizienten werden maßgeblich auf die unterschiedlichen Optiken zurückgeführt.



**Abbildung 6.3:** Konvergenzverhalten des Variationskoeffizienten am Beispiel einer Kraftfahrzeugsignalleuchte.

In Anbetracht der vielen Freiheitsgrade erscheint eine absolute Beschreibung der zu erreichenden Gleichmäßigkeit mittels des Variationskoeffizienten nicht als sinnvoll. Eine Möglichkeit wäre jedoch, zumindest einen Pixelkalibrierfaktor  $a$  zu definieren, über den die metrische Ausdehnung eines Pixels bestimmt werden kann. Dieser hängt vom Messabstand  $r$ , der verwendeten Objektivbrennweite  $f_0$  und der Ausdehnung eines Sensorelementes  $d_{\text{Pixel}}$  ab und könnte dazu dienen, durch geeignete Vorgaben, die Ergebnisse vergleichbar zu gestalten. Der Einfach-

heit halber wird nachfolgend nur die eindimensionale Ausdehnung von quadratischen Pixeln betrachtet. Die nachfolgende Gleichung zeigt die Berechnung des Pixelkalibrierfaktors:

$$a = \frac{r \cdot d_{\text{pixel}}}{f_0} . \quad (6.1)$$

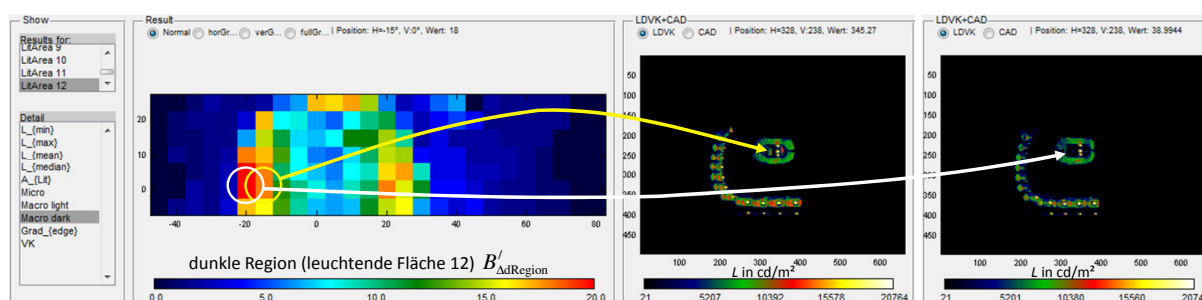
In dieser Arbeit wird nur eine Kamera-Objektiv-Kombination eingesetzt und die Messabstände variieren nicht sehr stark. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Auflösung der Kamera einen sehr großen Einfluss auf den Variationskoeffizient hat. Das liegt unter anderem daran, dass solange die Ungleichmäßigkeiten kleiner sind als das Messraster, bei zunehmender Auflösung in der Regel auch die Standardabweichung der Leuchtdichten innerhalb der Leuchtdichteverteilung zunimmt, während die mittlere Leuchtdichte annähernd gleich bleibt. Für die Messungen innerhalb der Arbeit werden Werte für den Pixelkalibrierfaktor von maximal  $a = 0,5$  mm verwendet. Unter Einsatz von Gleichung (2.2) ergibt sich eine Sehschärfe von  $s = 2,0$ , um unter idealen Bedingungen die einzelnen Pixel noch entsprechend der Kamera erkennen zu können. Dies sollte vor allem für moderne Leuchtdichtemesskameras berücksichtigt werden, die typischerweise eine deutlich höhere Sensorauflösung und damit verkleinerte Pixelabmessungen aufweisen. Um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, muss hier beispielsweise eine Verringerung der Auflösung der Leuchtdichteverteilungen erfolgen.

Neben dem allgemeinen Modell zur Bewertung der Gleichmäßigkeit innerhalb einer leuchtenden Fläche sind in Abschnitt 3.3.1 ab Seite 56 noch weitere Ansätze zur Suche spezieller, die Gleichmäßigkeit beeinträchtigender, Effekte entwickelt worden. Diese wurden nicht über die Probandenuntersuchung abgesichert, sollen hier aber trotzdem anhand eines Beispiels diskutiert werden.

Der eine Algorithmus dient zur Erkennung von Streifen oder Kanten innerhalb der Leuchtdichteverteilung, der andere erkennt helle oder dunkle Flecken. Für beide Algorithmen müssen Größenanforderungen für die zu erkennenden Effekte definiert werden, die hier als Vorschläge dargelegt werden. Dabei handelt es sich um die Mindestlänge des gefundenen Gradienten im ersten Fall und die minimale Fläche des Flecks im anderen. Für den Gradienten wird eine Mindestlänge von  $b = 15$  mm angenommen, was ungefähr der Mindestlänge üblicherweise bemängelter Kanten entspricht. Durch die Vorgabe einer Mindestgröße wird außerdem eine versehentliche Detektion von benachbarten Pixeln mit großen Leuchtdichteunterschieden, also hohen Gradienten, aufgrund von Pixelrauschen im Sensor vermieden. Eine Glättung zur Reduktion des Rauschens, wie sie in Abschnitt 2.6.1 ab Seite 39 beschrieben wird, sollte vor der Kantendetektion nicht erfolgen, damit die Gradienten nicht abgeschliffen und somit nicht mehr gefunden werden können.

Für den zweiten Algorithmus zur Erkennung von dunklen und hellen Regionen innerhalb der leuchtenden Fläche wird eine minimale Fläche von  $A = 25 \text{ mm}^2$  angenommen, um ebenfalls nicht zu kleine Störstellen zu finden und damit die Suche frühzeitig abubrechen. Abbildung 6.4 zeigt das Ergebnis der Dunkle-Regionen-Suche für die große leuchtende Fläche einer LED-Leuchte. Der Ergebnisverteilung kann entnommen werden, dass bei einem Betrachtungswinkel von  $\vartheta = 0^\circ$  und  $\varphi = -20^\circ$  die dunkelste Region innerhalb der leuchtenden Fläche liegt. Da es sich dabei um einen Betrachtungswinkel handelt, der nicht sonderlich weit außen liegt, besteht hier durchaus Optimierungsbedarf. Für die Aufwertung der Software, wäre hier beispielsweise eine Gewichtungsfunktion über die Betrachtungswinkel denkbar.

Für die speziellen Algorithmen wird auch noch eine Abhängigkeit zur Orientierung und zur Lage der gefundenen Effekte und der Form der leuchtenden Fläche erwartet. Die Gradientensuche



**Abbildung 6.4:** Bewertung der großen Einzelkammer einer LED-Leuchte mit dem Algorithmus zur Detektion von dunklen Regionen innerhalb einer leuchtenden Fläche. Zusätzlich werden zwei Leuchtdichteverteilungen aus benachbarten Betrachtungsrichtungen gezeigt, welche die gefundene dunkle Region anzeigen.

weist wertmäßig außerdem eine große Abhängigkeit zur Sensoraufösung auf, was allerdings über die definierte Mindestlängenanforderung kompensiert wird. Aktuell sind die Algorithmen so gestaltet, dass sie bereits nach einer gefundenen Störstelle die Suche abbrechen. Meist liegen innerhalb einer leuchtenden Fläche in eine bestimmte Betrachtungsrichtung noch weitere Störstellen vor, die im Moment nicht beachtet werden. Um weitere Störstellen mit zu beachten, müssten zahlreiche Vorgaben festgelegt werden, wie die maximale Anzahl, die minimale Fläche und die Verrechnung der Werte der Störstellen miteinander, die innerhalb der Arbeit nicht untersucht wurden und damit jeglicher wissenschaftlicher Grundlage entbehren.

### Gleichmäßigkeit zwischen leuchtenden Flächen

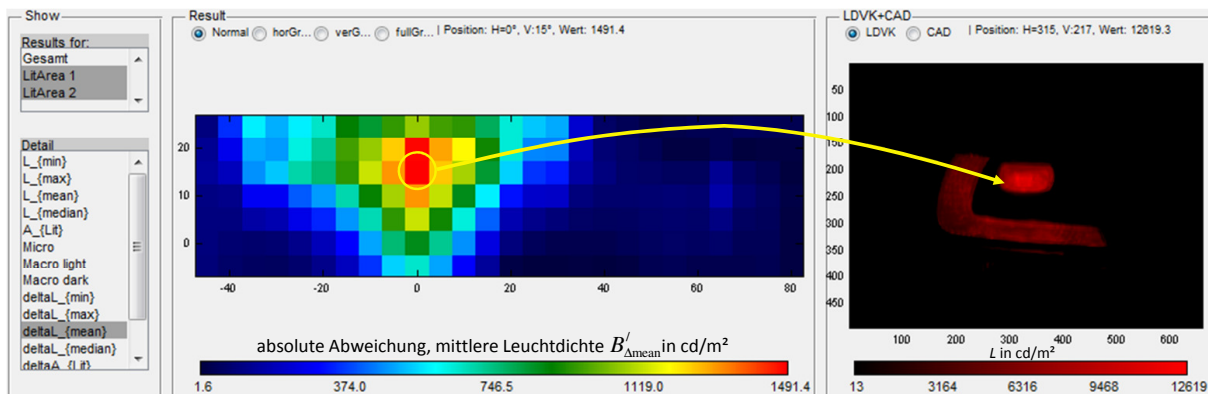
In der Literatur zur Bewertung der Sichtbarkeit von Signalleuchten ist beschrieben, dass eine Bewertung der vollständigen leuchtenden Fläche anhand der mittleren Leuchtdichte der leuchtenden Fläche erfolgen sollte [Rip01a, Arm01, Kal09]. Es sind verschiedene Modelle zur Beschreibung der Abweichung der gemessenen mittleren Leuchtdichte der leuchtenden Fläche zur theoretischen mittleren Leuchtdichte aus abgegebener Lichtstärke und Größe der leuchtenden Fläche vorgestellt worden. In dieser Arbeit werden direkt die mittleren Leuchtdichten der leuchtenden Flächen bestimmt. Korrekturfaktoren, welche die Abweichung von der theoretischen mittleren Leuchtdichte beschreiben, sind somit nicht zu berücksichtigen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass eine gewisse nicht weiter quantifizierte Gleichmäßigkeit innerhalb der leuchtenden Flächen vorliegen muss, um bei der Bewertung der Helligkeitsunterschiede zwischen den leuchtenden Flächen auf die mittlere Leuchtdichte zurückgreifen zu können.

Die mittlere Leuchtdichte wird für jede untersuchte Betrachtungsrichtung über eine Maskierung, die den geometrischen Ort der leuchtenden Flächen innerhalb der Leuchtdichteverteilung beschreibt, genau bestimmt. Anschließend kann die relative oder absolute Abweichung zwischen zwei ausgewählten leuchtenden Flächen berechnet werden, was in Abschnitt 3.3.2 ab Seite 59 erläutert wird. Innerhalb der Probandenuntersuchung werden die durch den Menschen akzeptierten Unterschiede der mittleren Leuchtdichten zwischen den Flächen untersucht. Eine Diskussion der Ergebnisse folgt in Abschnitt 6.2.

Für die Bewertung der Gleichmäßigkeit zwischen leuchtenden Flächen sind auch Signalleuchten interessant, die aus einer Vielzahl von kleinen Einzelkammern mit direktabstrahlenden LED

bestehen. Diese weisen typischerweise recht große Ungleichmäßigkeiten innerhalb einer Reflektorkammer auf. Dies sollte zu sehr schlechten Bewertungen von LED-Leuchten führen. Aufgrund der Abgrenzung der einzelnen Kammern zueinander erfolgt hier jedoch schon bei sehr geringen Betrachtungsabständen eine Bewertung der mittleren Leuchtdichten der einzelnen Kammern, was gestaltungspsychologisch wohl auf ein Gruppierungsprinzip zurückzuführen ist. Eine solche Leuchte wird in Abbildung 6.4 gezeigt.

Das Bewertungsverfahren wurde zur Kontrolle der Tauglichkeit noch auf eine weitere Leuchte angewendet, die aus zwei leuchtenden Flächen besteht. Abbildung 6.5 zeigt die Benutzeroberfläche der Software und eine eingeladene Leuchte. Dargestellt ist das Kriterium mittlere Leuchtdichteunterschiede zwischen den leuchtenden Flächen. Der Ergebnisverteilung ist zu entnehmen, dass bei einer Betrachtung der Leuchte aus  $\vartheta = 15^\circ$  und  $\varphi = 0^\circ$  die größten Unterschiede zwischen den mittleren Leuchtdichten bestehen. Zusätzlich zur Ergebnisverteilung wird die zur Betrachtungsrichtung passende Leuchtdichteverteilung mit einer roten Farbskala angezeigt. Das Leuchtdichtebild bestätigt die hohe absolute Differenz der mittleren Leuchtdichten der zwei leuchtenden Flächen.



**Abbildung 6.5:** Messungen (Differenz der mittleren Leuchtdichten der zwei leuchtenden Flächen) mit einer Leuchte, welche ein vergleichbares Wirkprinzip aufweist, wie die in den Untersuchungen verwendeten.

## 6.2 Lichttechnische Untersuchungen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit

Mit der in Kapitel 4 vorgestellten Probandenuntersuchung wurden unterschiedliche Sachverhalte abgefragt, die im Leuchtenentwicklungsprozess von Interesse sind.

Die erste Untersuchung widmete sich dem Einfluss der Umgebungshelligkeit auf die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit anhand von realen Leuchten. Dabei wurden zwei Fälle betrachtet, einerseits aneinandergebaute leuchtende Flächen (Abgleich) und andererseits leuchtende Flächen, die einen Kfz-typischen Abstand von 30 mm zueinander aufweisen (Vergleich). Die Untersuchung erfolgte anhand von drei typischen Leuchtenleuchtdichten und vier im Bewertungsumfeld realisierbaren Umfeldleuchtdichten. Die Fragestellung lautete im Wesentlichen: Wie muss die Umgebungshelligkeit bei kritischer Bewertung einer Leuchte beschaffen sein?

Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass die hellste realisierbare Umgebungsleuchtdichte von  $L_u = 100 \text{ cd/m}^2$  für eine kritische Bewertung zu wählen ist. Die gute Überlagerung der Kurven für die unterschiedlichen Leuchtenleuchtdichten bestätigt das Webersche Gesetz und damit, dass mit steigender Leuchtenleuchtdichte auch die Leuchtdichtedifferenz der Vergleichsleuchte zunehmen kann. Das heißt, der Beobachter wird unempfindlicher auf die Leuchtdichteunterschiede. Die Linearität der Kurvenverläufe in Abbildung 4.6 auf Seite 69 legt die Vermutung nahe, dass noch höhere Umgebungsleuchtdichten zu noch kleineren Leuchtdichteunterschieden führen. Dies wurde aufgrund der fehlenden technischen Möglichkeiten zur Erzeugung einer gleichmäßigen Umgebungsleuchtdichte jedoch nicht untersucht. Die Ergebnisse, in Form eines akzeptierten relativen Leuchtdichteunterschiedes, werden für die aneinandergebauten leuchtenden Flächen und für eine praktikable Anwendung leicht gerundet folgendermaßen zusammengefasst:

$$l_{\text{abgleich}} = \frac{\Delta L}{L_{\text{ref}}} = 0,2. \quad (6.2)$$

Für die getrennten leuchtenden Flächen ergibt sich gleichsam:

$$l_{\text{vergleich}} = \frac{\Delta L}{L_{\text{ref}}} = 0,3. \quad (6.3)$$

Das heißt, dass bei einer typischen mittleren Leuchtdichte eines Schlusslichts im europäischen Raum, von ungefähr  $1000 \text{ cd/m}^2$ , eine zugehörige zweite leuchtende Fläche einen maximalen Leuchtdichteunterschied von  $300 \text{ cd/m}^2$  aufweisen darf, um noch als gleich hell akzeptiert zu werden. Dieser Wert ist recht hoch, was sich jedoch mit den zu einer typischen Laboruntersuchung abweichenden Bedingungen begründen lässt. So wurden absichtlich Leuchten eingesetzt, die innerhalb der einzelnen leuchtenden Flächen aufgrund der verwendeten Optikscheiben eine für Kfz-Leuchten typische Ungleichmäßigkeit in der Helligkeitsverteilung aufweisen.

In den weiteren Untersuchungen wurde überprüft, inwieweit die softwareseitige Bewertung der Untersuchungsobjekte über den Variationskoeffizienten mit der Bewertung durch die Probanden korreliert. Dazu kann festgehalten werden, dass Bestimmtheitsmaße von  $R^2 = 0,73$  bis  $R^2 = 0,88$  erreicht werden konnten, was einer mittleren bis guten Korrelation entspricht. Für die doch sehr subjektive Größe Gleichmäßigkeit ist der Zusammenhang jedoch als äußerst positiv zu betrachten. Bei der Leuchte, deren Schlusslichtfunktion über zwei leuchtende Flächen erzeugt wird, lag das kleinste Bestimmtheitsmaß vor. Den Kommentaren im Fragebogen konnte entnommen werden, dass oftmals Unterschiede zwischen den leuchtenden Flächen zur Abgabe einer Bewertung führten und das, obwohl der Abstand zwischen Betrachter und Untersuchungsobjekt mit 4 m recht kurz gewählt war. Das verwendete Bewertungsmodell des Variationskoeffizienten wird über Gleichung (4.2) auf Seite 79 beschrieben. Durch die Verwendung dieses Modells erhöhte sich das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,67$  auf  $R^2 = 0,81$ . Es kann abgeleitet werden, dass der Mensch bei Leuchten, die aus mehreren leuchtenden Flächen bestehen, auch bei relativ kurzen Betrachtungsabständen bereits eine relative Bewertung vornimmt, da sich eine Vergleichsmöglichkeit bietet. Es wird erwartet, dass bei zunehmendem Abstand eher der Unterschied der mittleren Leuchtdichte und nicht des Variationskoeffizienten der einzelnen leuchtenden Flächen bewertet werden muss. Bei den kurzen Betrachtungsabständen der Probandenuntersuchung war dies jedoch nicht der Fall.

Speziell die Frage nach einer absoluten Bewertung der Gleichmäßigkeit von Kraftfahrzeugsignalleuchten konnte nicht geklärt werden, da hier zu viele Abhängigkeiten von der Beschaffenheit der Leuchte und dem verwendeten Messsystem bestehen, die im Rahmen der Arbeit nicht ausreichend eingeschränkt werden konnten.



## 6.3 Erweiterte Kenntnis über die Informationen innerhalb einer Leuchtdichtevertelung

Innerhalb einer Leuchtdichtevertelung, die eine Signalleuchte zeigt, gehören üblicherweise nur eine begrenzte Anzahl an Pixeln zur leuchtenden Fläche. Über eine Bewertungssoftware soll bestimmt werden, ob die leuchtende Fläche vollständig zu sehen ist oder die Helligkeitsverteilung innerhalb der leuchtenden Fläche gleichmäßig erscheint. Dafür muss der geometrische Ort der leuchtenden Fläche bekannt sein. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Methode entwickelt, wie der Bewertungssoftware die benötigten Informationen für alle gewünschten Betrachtungsrichtungen zur Verfügung gestellt werden können.

In der Arbeit wird ein Ansatz zur Beschreibung der leuchtenden Flächen verfolgt, welcher auf der Idee der *augmented reality*, also der Erweiterung einer natürlichen Darstellung um computergenerierte Zusatzinformationen, basiert. Als natürliche Darstellung dienen hier gemessene Leuchtdichtevertelungen, welche mit computergenerierten Zusatzinformationen, in diesem Fall den Geometriedaten der leuchtenden Flächen, überlagert werden. Das prinzipielle Vorgehen wird in Abbildung 5.10 auf Seite 97 gezeigt. Damit eine erfolgreiche Überlagerung möglich ist, müssen die Geometriedaten nach der in Abschnitt 5.2.2 ab Seite 92 beschriebenen Methode projektiv transformiert werden. Das Vorgehen ist nur dann sinnvoll einzusetzen, wenn zu den Geometrieinformationen der leuchtenden Flächen auch verdeckende Flächen mit berücksichtigt werden, da sonst, aus bestimmten Betrachtungsrichtungen, Anteile der leuchtenden Flächen bewertet werden, die aus dieser Richtung, wegen beispielsweise verdeckender Gehäuseteile, gar nicht gesehen werden können. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5.7 auf Seite 92 dargestellt und muss bei jeder Leuchte zwingend mit berücksichtigt werden, wenn eine angemessene Bewertung erfolgen soll.

Für die aufgezeigte Methodik werden somit immer Geometriedaten benötigt. Tabelle 6.1 vergleicht unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der leuchtenden Flächen.

**Tabelle 6.1:** Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der leuchtenden Flächen.

Methodik	Vorteile	Nachteile
Geometriedaten, Abschnitt 5.2.1	sehr genau; bei Berücksichtigung verdeckender Flächen wird die korrekte sichtbare leuchtende Fläche gefunden; für alle Optikkonzepte anwendbar	es werden die Geometriedaten und die Kameraparameter benötigt
Leuchtdichteschwellwert, z. B. [EPLLA]	automatische Berücksichtigung verdeckender Flächen; es wird nur die Leuchtdichtevertelung benötigt	dunkle Bereiche der leuchtenden Fläche nicht berücksichtigt; es kann keine korrekte mittlere Leuchtdichte bestimmt werden; Gleichmäßigkeit kann nicht bewertet werden, da dunkle Flecken nicht berücksichtigt
Kantendetektion, Abschnitt 2.6.2	automatische Berücksichtigung verdeckender Flächen; nach erfolgreicher Detektion der leuchtenden Fläche werden auch dunkle Bereiche innerhalb berücksichtigt	die nötige Kantendetektion funktioniert nur für Leuchten, die eine sauber abgegrenzte leuchtende Fläche aufweisen
98%-Regel, Abschnitt 2.2.1	keine Geometriedaten und keine Leuchtdichtevertelungen benötigt; leuchtende Fläche wird mithilfe der Lichtstärke bestimmt; Methode ist Bestandteil der fahrzeugtechnischen Normen	tatsächliche Form der leuchtenden Fläche bleibt unberücksichtigt; eine Auswertung nach den aufgestellten Kriterien ist unmöglich

Außer der Methode mit Geometriedaten, sind alle anderen für die Auswertung von Leuchtdichtevertelungen aus seitlichen Betrachtungswinkeln fehleranfällig. Dies lässt sich über die in diese Richtungen stark reduzierte Leuchtdichte und die zu erwartende Abnahme der Gleichmäßigkeit begründen. Die in dieser Arbeit geschaffene Methode zur Beschreibung der leuchtenden Fläche mithilfe von Geometriedaten ist nicht anfällig gegenüber den genannten Problemen bei

der seitlichen Betrachtung. Außerdem erfolgt bei einer Berücksichtigung von verdeckenden Flächen eine präzise Bestimmung der sichtbaren leuchtenden Fläche, die eine Bestimmung der mittleren Leuchtdichte, auch unter Beachtung dunkler Bereiche, zulässt.

Die benötigten Geometriedaten, die üblicherweise nur dem Entwickler zur Verfügung stehen, schränken den Anwenderkreis der Methode jedoch sehr stark ein. Aus diesem Grund wird die Methode dahingehend angepasst, dass auf Basis der aufgenommenen Leuchtdichteverteilungen, 3D-Geometrieinformationen der leuchtenden und auch der verdeckenden Flächen gezeichnet werden können, siehe Abschnitt B.2 ab Seite 135. Somit bleiben alle Vorteile der geometriedatenbasierten Methode erhalten, ohne dass weiterhin Geometriedaten benötigt werden. Somit können beispielsweise auch Leuchten von Wettbewerbern gemessen werden.

## 6.4 Verfahren zur Messung und Bewertung von Signallichtfunktionen

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Bewertungsverfahren für Signalleuchten entwickelt, welches eine Leuchte definiert rotieren und aus definierten Richtungen Leuchtdichteverteilungen der Leuchte messen kann. Zusätzlich dazu können die CAD-Daten der leuchtenden Flächen ebenfalls rotiert und entsprechend der jeweiligen Kameraparameter transformiert und als binäre Maskierung für die Weiterverarbeitung abgespeichert werden. Die erzeugten Leuchtdichteverteilungen werden nach der Messung mit den zugehörigen Maskierungen der leuchtenden Flächen überlagert und nach unterschiedlichen Kriterien ausgewertet.

Die Grundlage der Bewertung sind gemessene Leuchtdichteverteilungen. Dadurch bietet das Messsystem prinzipiell die Möglichkeit, jede erdenkliche Bewertungsmethode, die auf Leuchtdichteverteilungen angewendet werden kann, zu nutzen. Da für jede Leuchtdichteverteilung zusätzlich eine Maske mit den geometrischen Informationen zur Lage der leuchtenden Flächen zur Verfügung steht, können sehr einfach eigene Bewertungskriterien in die Software implementiert werden. Aktuell können für alle gemessenen Betrachtungsrichtungen bereits die minimalen, maximalen und mittleren Leuchtdichten der gesamten Verteilung einer einzelnen leuchtenden Fläche oder ausgewählter leuchtender Flächen berechnet werden. Für eine einzelne leuchtende Fläche existieren noch andere Kriterien, wie die Berechnung des Variationskoeffizienten, die Bestimmung der projizierten Fläche der leuchtenden Fläche und eine Bewertung nach den Algorithmen aus Abschnitt 3.3.1 ab Seite 56 zur Suche und Bewertung von Streifen und hellen oder dunklen Flecken. Zwischen den jeweils ausgewählten leuchtenden Flächen kann außerdem die relative und absolute Abweichung der zuvor genannten Kriterien berechnet werden. So kann zum Beispiel die mittlere Leuchtdichte zwischen zwei leuchtenden Flächen bestimmt, deren Abweichung berechnet und damit eine Aussage zur Gleichmäßigkeit getroffen werden.

Die Umsetzung des Messsystems erfolgte mittels vorhandener Messtechnik. Prinzipiell wäre auch ein Nahfeldgoniometer für die Messung einsetzbar, die in Tabelle 5.1 auf Seite 86 untersuchten Vor- und Nachteile sprechen jedoch gegen eine Verwendung eines solchen. Das Nahfeldgoniometer bietet zwei große Vorteile gegenüber dem hier aufgebauten Messsystem. Zum einen entfällt die aufwendige Ausrichtung der einzelnen Komponenten zueinander, da sie fest verbaut sind, zum anderen können bei der Berechnung der Leuchtdichteverteilungen aus den erzeugten Strahldatendateien nahezu beliebige Betrachtungsabstände und damit Perspektiven berechnet werden. Im hier aufgebauten Messsystem ergibt sich die Perspektive direkt aus

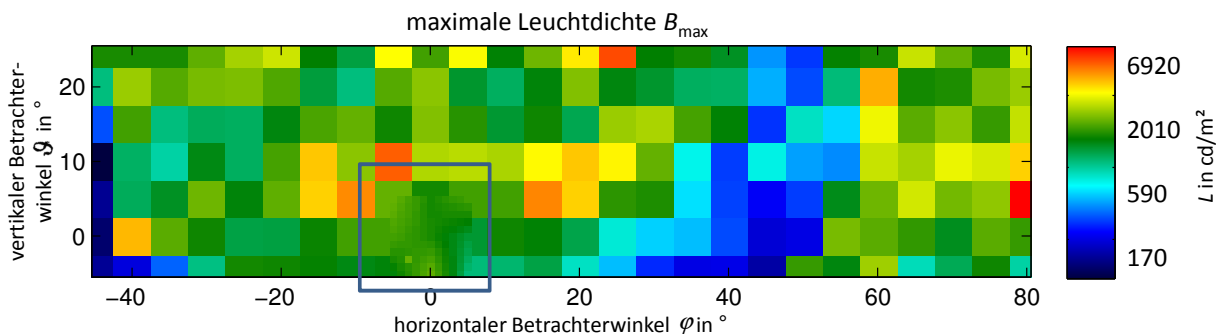
dem Messabstand und kann auch nicht variiert werden. Der typische Messabstand von 3-5 m zwischen Kamera und Untersuchungsobjekt entspricht allerdings annähernd dem einer Bewertungssituation im Entwicklungsprozess.

Das neue Messsystem ist in der Lage, nicht nur Schlussleuchten, sondern beliebige Signalleuchten, also auch Tagfahrlichter, Fahrtrichtungsanzeiger oder Bremsleuchten, zu bewerten. Allerdings werden dafür weiterführende Untersuchungen benötigt, da sich die gewonnenen Ergebnisse nicht ohne Anpassungen übertragen lassen. Beispielsweise sollte bei der Bewertung eines Fahrtrichtungsanzeigers im Scheinwerfer der eventuell vorhandene kurze Abstand zum wesentlich helleren Abblendlicht berücksichtigt werden. Noch nicht erwähnt wurde, dass mit dem neuen Messsystem die Möglichkeit bereitsteht, die aus beliebigen Betrachtungsrichtungen automatisiert gemessene Leuchte, mithilfe der in Abschnitt 5.3.2 ab Seite 98 vorgestellten Skalierungsverfahren, mit einem geeigneten Programm für die Anzeige von 2D-Bildern eines 3D-Objektes beispielsweise am Bildschirm zu präsentieren [Men10].

## 6.5 Übersichtliche Darstellung der Messergebnisse

Ähnlich einer Lichtstärkeverteilung werden die berechneten Ergebnisse der einzelnen Kriterien, wie z. B. die Größe oder Sichtbarkeit der leuchtenden Flächen, die mittleren oder maximalen Leuchtdichten oder die Beurteilung der Gleichmäßigkeit, in einer 2D-Verteilung angezeigt. Dadurch wird eine sehr kompakte Darstellung der Messergebnisse ermöglicht. Ein einzelnes Gütekriterium kann somit aus allen Betrachtungsrichtungen sehr anschaulich „auf einen Blick“ beurteilt werden, anstatt die beispielsweise 182 Leuchtdichteverteilungen einer Schlusslichtfunktion einzeln durchschauen und bewerten zu müssen.

Die Messauflösung von aktuell  $5^\circ$  in horizontaler und vertikaler Richtung ist den gesetzlichen Anforderungen entnommen. In Einzelfällen kann eine höhere Auflösung gewünscht sein. Das bedingt, dass weit mehr Leuchtdichteverteilungen aufgenommen und ausgewertet werden müssen. Leider werden dabei auch in Betrachtungsrichtungen, die weniger interessant sind, mehr Informationen erzeugt. Für den genannten Fall ist eine Messung mit adaptivem Messbereich in das Messsystem integriert worden. Dadurch ist es möglich, nur in ausgewählten Winkelbereichen eine höhere Richtungsauflösung zu messen.



**Abbildung 6.6:** Ergebnisdarstellung mit hervorgehobenem ( $\square$ ) adaptivem Messbereich.

Die Ergebnisverteilung  $B_{\max}$  einer Messung mit adaptivem Messbereich ist in Abbildung 6.6 gezeigt. Die Messbereiche mit niedriger Auflösung werden für die Darstellung der Ergebnisverteilung auf den höheren Wert interpoliert. Dabei wird die Nächste-Nachbar-Interpolation

eingesetzt. Das heißt, dass die neu erzeugten Messpunkte, die in den Bereichen niedrigerer Auflösung mittels Interpolation erzeugt werden, immer dem nächstgelegenen realen Messwert entsprechen. Dadurch wird eine ungewollte Glättung der Ergebnisverteilung vermieden. Außerdem erkennt man in der Ergebnisverteilung direkt, dass adaptiv gemessen wurde und in den Randbereichen nur eine geringere Anzahl an Auswertungen zur Verfügung steht.



## 7 Zusammenfassung

Gegenstand der Arbeit ist ein Bewertungsverfahren für das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit von Signalleuchten. Dafür erfolgt eine Analyse der Einflussfaktoren auf die Gleichmäßigkeit und es werden Methoden zur Bewertung der zwei identifizierten Ausprägungen der Gleichmäßigkeit entwickelt. Die zwei Ausprägungen sind zum einen die Gleichmäßigkeit der Helligkeitsverteilung innerhalb einer leuchtenden Fläche und zum anderen die Gleichmäßigkeit der Helligkeit zwischen mehreren leuchtenden Flächen. Welche der beiden Varianten gerade betrachtet wird, hängt von der Aufgabenstellung, dem Betrachtungsabstand sowie dem Abstand und der Anzahl der leuchtenden Flächen ab.

Für die Bewertung der Helligkeitsverteilung innerhalb einer leuchtenden Fläche kann der Variationskoeffizient, für die Bewertung zwischen leuchtenden Flächen die mittlere Leuchtdichte der einzelnen Flächen, genutzt werden. Bei geringen Betrachtungsabständen und Leuchten mit mehr als einer leuchtenden Fläche kann unter Umständen ein Bewertungsmodell erforderlich sein, welches als eine Art Kombination der beiden genannten Ausprägungen angesehen werden kann. Die lichttechnischen Untersuchungen dieser Arbeit hatten für die genannten Randbedingungen eine Addition aus dem Variationskoeffizient aller leuchtenden Flächen und dem Unterschied der Variationskoeffizienten der einzelnen leuchtenden Flächen als Ergebnis.

Allen Bewertungsmethoden ist gemein, dass der geometrische Ort der leuchtenden Fläche innerhalb der Leuchtdichteverteilung bekannt sein muss. In der Arbeit wird eine Möglichkeit entwickelt, bei der die Geometriedaten der Leuchte so transformiert werden, dass sie anschließend genau die leuchtenden Flächen innerhalb der Leuchtdichteverteilungen einer Leuchte anzeigen. Dabei werden auch verdeckende Flächen, also beispielsweise Gehäuseteile der Leuchte, mit berücksichtigt.

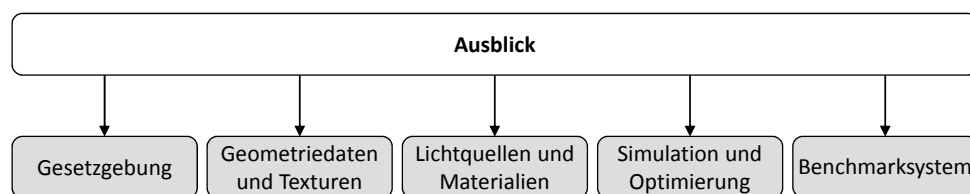
Die Nutzung der Geometriedaten ist noch aus einem weiteren Grund sehr hilfreich. Eine Leuchte wird sowohl im Straßenverkehr als auch im Entwicklungsprozess aus vielen verschiedenen Richtungen betrachtet. Damit sie ihrer Aufgabe, die Unterstützung des Wahrnehmungsprozesses, gerecht werden kann, muss sie aus möglichst allen relevanten Betrachtungsrichtungen gut zu erkennen sein. Dies führt dazu, dass die Bewertung der Leuchte aus nur einer Richtung, parallel der Bezugsachse der Leuchte, nicht ausreicht. Um eine Aussage treffen zu können, sollte eine Bewertung aus allen relevanten Richtungen erfolgen. Dies führt jedoch dazu, dass die leuchtenden Flächen nicht nur in einer einzigen, sondern in beliebig vielen Leuchtdichteverteilungen bestimmt werden müssen. Durch die Verwendung von Geometriedaten zur Beschreibung der leuchtenden Flächen und der Kenntnis über die aktuelle Blickrichtung auf die Leuchte kann mithilfe der projektiven Transformation eine der aktuellen Bewertungssituation angepasste Darstellung der leuchtenden Fläche erfolgen. Somit kann in allen Leuchtdichteverteilungen einwandfrei bestimmt werden, welche Pixel zur leuchtenden Fläche gehören und welche nicht.

Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus werden die transformierten Geometriedaten am richtigen geometrischen Ort innerhalb einer jeden Leuchtdichteverteilung positioniert. Daraufhin kann eine Auswertung aller Leuchtdichteverteilungen nach den unterschiedlichen Kriterien erfolgen. In die Bewertungssoftware implementierte Bewertungskriterien sind beispielsweise die maximale und mittlere Leuchtdichte, die projizierte Fläche und der Variationskoeffizient einer leuchtenden Fläche. Für die während des Entwicklungsprozesses einer Leuchte häufig angemerkten Streifen oder Flecken innerhalb der Leuchtdichteverteilung, werden spezielle Algorithmen zur Verfügung gestellt.

Für die vielen, während einer automatisiert ablaufenden Messung, aufgenommenen Leuchtdichteverteilungen und den daraus gewonnenen Ergebnissen der einzelnen Kriterien wurde eine übersichtliche Ergebnisdarstellung entwickelt, die in ihrer Erscheinung den im Automobilbau üblichen Lichtstärkeverteilungen ähnelt. Innerhalb der Software ist die Ergebnisverteilung mit den einzelnen Leuchtdichteverteilungen verknüpft. Nach Auswahl eines einzelnen Wertes der Ergebnisverteilung wird die zur aktuellen Betrachtungsrichtung gehörige Leuchtdichteverteilung geladen und angezeigt.

## 8 Ausblick

Das neue Verfahren zur Bewertung der Gleichmäßigkeit von Kfz-Signalleuchten auf Basis von Leuchtdichteverteilungen, welches in dieser Arbeit vorgestellt worden ist, bot bereits während der Bearbeitung der eigenen Aufgabenstellung sehr viele Anregungen für zukünftige Untersuchungen. Nachfolgend werden die wichtigsten erläutert.



**Abbildung 8.1:** Weiterführende Themen, die sich von dieser Arbeit ableiten lassen.

Die letzten zwei betrachteten Themen sind speziell aus Sicht der Leuchtenentwicklung interessant und werden bereits aktiv weiterverfolgt. Zum einen soll das hier vorgestellte Verfahren auf Basis von simulierten Leuchtdichteverteilungen angewendet werden, damit es frühzeitig im Entwicklungsprozess zur Anwendung kommen kann und zum anderen soll ein Benchmarksystem für Signalleuchten entwickelt werden, in welchem die Ergebnisverteilungen von beispielsweise zwei Entwicklungsständen einer Leuchte gegeneinander ausgewertet werden können.

### 8.1 Anpassungen innerhalb der Gesetzgebung

Als erstes weiterführendes Thema sei hier der Wunsch nach einer Anpassung der Gesetzgebung genannt. Innerhalb der gesetzlichen Regelungen werden sowohl für Scheinwerfer als auch für Leuchten zulässige Lichtstärken in festgelegten Raumwinkeln definiert, die für eine Zulassung zu erreichen sind. Wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit ausgeführt, besteht der Hauptzweck einer Signalleuchte jedoch darin, dass sie vor allem gesehen werden muss. Die Sichtbarkeit lässt sich über die Lichtstärke aber nur bedingt gut beschreiben, weswegen viele Autoren die Leuchtdichte für die im Straßenverkehr herrschenden Bedingungen empfehlen und einige bereits Vorschläge für die Anpassung der gesetzlichen Regelungen unterbreiteten [Arm01, Rip01a]. Aus Sicht des Autors existiert ein Bedarf an einer Anpassung der Regelungen, da für die Beschreibung von Signalleuchten die Leuchtdichte die korrekte lichttechnische Größe ist und auch diese innerhalb der Regelungen abgeprüft werden sollte. Es gibt außerdem mehrere Untersuchungen, die auch für Scheinwerfer Kriterien auf Basis von Leuchtdichteverteilungen hervorgebracht haben [Völ06, Kle03].

Das Thema dieser Arbeit widmet sich vordergründig dem Leuchtenentwicklungsprozess und der frühzeitigen Absicherung vor allem ästhetischer Anforderungen, welche an die Nachtsignatur einer Leuchte gestellt werden. Dadurch entstand ein Messsystem, welches mithilfe von



Leuchtdichteverteilungen eine Bewertung der Leuchte aus einer großen Anzahl von Richtungen ermöglicht. Eine Methode zur sicheren Ermittlung der leuchtenden Flächen ist ebenfalls Bestandteil der Arbeit. Durch die Kombination der Leuchtdichteverteilungen und der Kenntnis der Lage der leuchtenden Flächen kann sehr präzise die mittlere Leuchtdichte einer Leuchte in beliebige Betrachtungsrichtungen ermittelt werden. Damit sind zumindest alle technischen Beschränkungen beseitigt und die betrachterwinkelabhängigen Leuchtdichten könnten in der Gesetzgebung berücksichtigt werden.

Eine zukünftige Arbeit könnte helfen, genau die Anpassung der Gesetzgebung hinsichtlich der Nutzung der Leuchtdichte bereitzustellen. Dabei sollten die offenen Fragen beantwortet und zusammen mit den Automobilherstellern, den Zulieferfirmen und dem Gesetzgeber eine gemeinsame Meinung entwickelt und vertreten werden, um eine Umsetzung innerhalb der Regelungen zu erreichen. Im Interesse der Hersteller sollte dabei bereits auf internationaler Ebene agiert werden, damit zukünftige Leuchten auf allen Absatzmärkten eingesetzt werden können.

## 8.2 Texturen und Geometriedatenreproduktion

Ein entscheidender Bestandteil des neuen Bewertungsverfahrens ist die Separierung der Leuchtdichteverteilungen in Leuchtdichteinformationen innerhalb und außerhalb der leuchtenden Flächen der Signalleuchte. Dies geschieht idealerweise über die Verwendung von perspektivisch projizierten CAD-Daten, wie sie jedem Automobilhersteller und Zulieferer für seine Signalleuchten vorliegen. Sollten einmal keine Geometriedaten verfügbar sein, muss auf andere Möglichkeiten zur Kenntlichmachung der leuchtenden Flächen zurückgegriffen werden. Eine Methode, welche zufriedenstellende Ergebnisse erzielt, allerdings manuelle Schritte und ein wenig Geduld des Bearbeitenden voraussetzt, ist in Abschnitt B.2 ab Seite 135 näher beschrieben. Die wissenschaftliche Literatur bietet hier weitere, sehr spannende Entwicklungen zur Fortführung der Erzeugung von Geometriedaten auf Basis von zweidimensionalen Leuchtdichteverteilungen. Dabei sollte eine weitere Automatisierung der Methode bei gleichbleibender Robustheit der Ergebnisse im Vordergrund stehen.

Für die in dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Leuchten, die Optiken auf der Zwischenlichtscheibe aufweisen, könnten sogenannte Shape-From-Texture-Verfahren [CCDG07, MH07] genutzt werden, um eine Orientierung der Flächen im Raum und anschließend deren Tiefe zu ermitteln. In Kombination mit den bekannten Kameraparametern sollten dann reale Größen berechnet und daraus vollständige Geometrieinformationen ermittelt werden können.

Ein weiterer Ansatz ist, dass aus einem Bild die leuchtende Fläche über einen Leuchtdichteschwellwert bestimmt wird. Anschließend werden daraus geometrische Grundformen abgeleitet, die dann entsprechend der gerade betrachteten Richtung rotiert und perspektivisch projiziert werden. Das resultierende Ergebnis kann als Vergleichswert für eine Hough-Transformation genutzt werden. Diese dient der Erkennung von parametrischen Formen, also einfachen geometrischen Objekten innerhalb von Binärbildern. Durch die im Normalfall abweichende Position von idealer und erkannter leuchtender Fläche kann aufgrund der Kenntnis über die Kameraparameter mit jeder weiteren ausgewerteten Leuchtdichteverteilung eine Tiefenkarte erzeugt und somit die fehlende Z-Komponente der leuchtenden Flächen automatisch bestimmt werden.

In dieser Arbeit ausgenommen, deswegen aber nicht weniger interessant, sind Texturen und spezielle Muster, also vom Designer beabsichtigte Ungleichmäßigkeiten innerhalb der leuchtenden Flächen. Wie bereits in Abbildung 3.5 auf Seite 49 gezeigt, gibt es eine Vielzahl von für den Menschen regelmäßige Strukturen, die mithilfe eines Bildverarbeitungsalgorithmus nur schwer korrekt bewertet werden können. Dies gilt vor allem dann, wenn der Algorithmus nicht auf das Muster trainiert ist. Im Straßenverkehr sind bereits Fahrzeuge mit Leuchten, die eine spiralförmige oder rechteckige leuchtende Flächen aufweisen, zu finden. Eine zukünftige Arbeit könnte sich genau mit der softwarebasierten Mustererkennung dieser *Regelmäßigkeiten auf höherer Ebene* beschäftigen. Denn auch diese können für den Menschen sichtbare Ungleichmäßigkeiten aufweisen, die aber nur entsprechend bewertet werden können, wenn dem System das zugrunde liegende Muster des zu bewertenden Objektes bekannt ist. Beispielsweise könnten über eine Fourieranalyse Unregelmäßigkeiten innerhalb von ansonsten periodischen Mustern erkannt werden. Mithilfe einer Gabor Filterbank ist es außerdem möglich, die Orientierung der periodischen Muster zu erkennen und Unregelmäßigkeiten von Verlaufsrichtungen aufzudecken [FS98]. Sowohl für Fourieranalyse als auch die Gabor Filter ist die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur sicheren Ermittlung der leuchtenden Flächen aus der vorliegenden Betrachtungsrichtung unerlässlich.

### 8.3 Neue Lichtquellen und Materialien

Im Hinblick auf die Bewertung der Gleichmäßigkeit müssen in den kommenden Jahren auch neue Lichtquellen und Materialien berücksichtigt werden. So soll eines Tages die OLED, ein leuchtender, organischer Halbleiter, soweit entwickelt sein, dass ein Einsatz im Fahrzeug nicht nur möglich, sondern auch sinnvoll ist. Mittlerweile sind außerdem neue Kunststoffe verfügbar, die sich durch eine hohe Lichtdurchlässigkeit bei gleichzeitig vorliegender sehr guter Streuung des Lichtes auszeichnen [Evo11]. Diese Kunststoffe eignen sich aufgrund ihrer photometrischen Eigenschaften sehr gut als Material für die Zwischenlichtscheibe einer Leuchte. Sie erzeugen, dank kleiner, lichtablenkender Partikel innerhalb des Materiales, bei einer Hinterleuchtung eine gleichmäßige Ausleuchtung der leuchtenden Flächen, wie es ganz ähnlich auch von der OLED erwartet wird. Dies führt dazu, dass Kanten innerhalb der leuchtenden Flächen sehr gut kaschiert werden, dadurch jedoch bei der Geometriereproduktion Schwierigkeiten zu erwarten sind. Außerdem wird erwartet, dass ein Abgleich der Helligkeiten zwischen mehreren leuchtenden Flächen, aufgrund der sehr guten Grundgleichmäßigkeit, schwieriger wird. Für die neuen Kunststoffe und Lichtquellen sollte untersucht werden, inwieweit sich für einen Abgleich der Helligkeit wirklich die mittleren Leuchtdichten der leuchtenden Flächen eignen. Eventuell sind auch eher bestimmte Regionen unterschiedlicher leuchtender Flächen, die nah beieinander liegen, maßgeblich, wie bereits in Tabelle 3.1 auf Seite 46 angedeutet. Wenn dies so ist, stellt sich die Frage, was diese Regionen auszeichnet und wie sich die für den Abgleich ausgesuchten Regionen über eine Variation des Betrachtungsabstandes verändern.

### 8.4 Simulation und Optimierung

Erschien eine Simulation und Erzeugung von beispielsweise 182 Leuchtdichteverteilungen mittels Ray-Tracing in endlicher Zeit vor wenigen Jahren noch unmöglich, so stellt dies mittler-

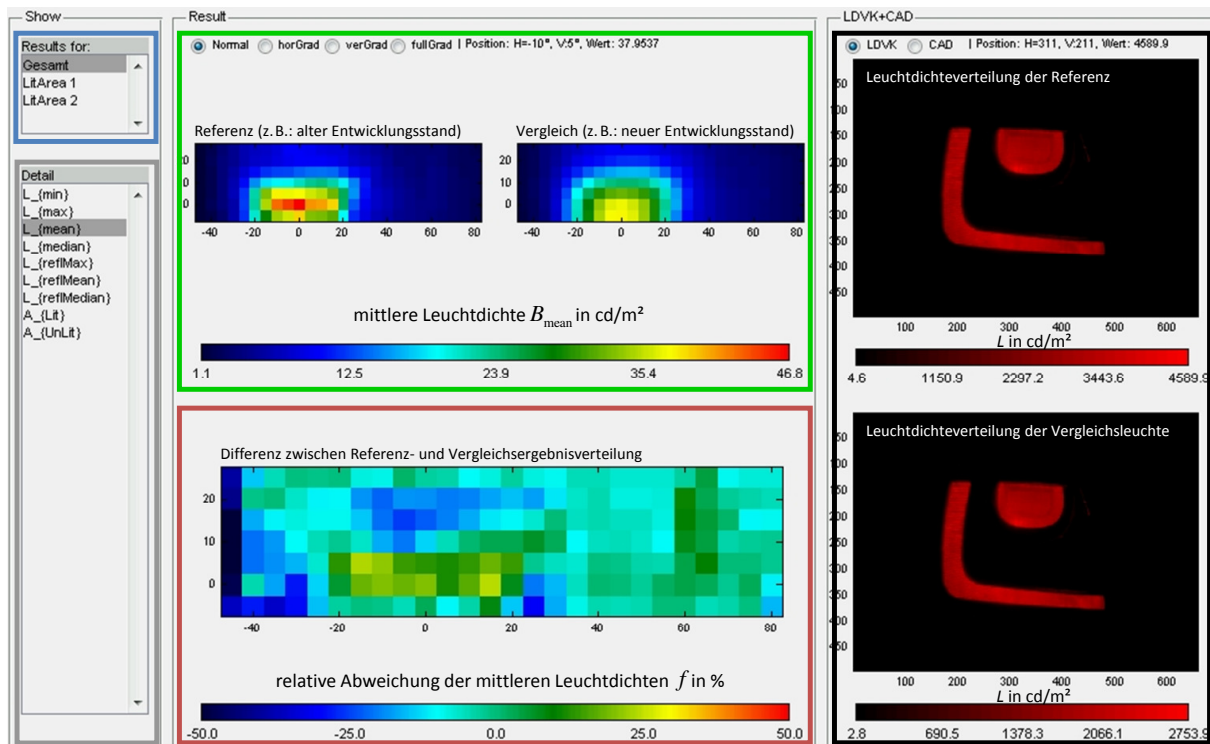
weile aufgrund der steten Entwicklung der Rechenleistung, der nötigen Algorithmen und der Softwareprodukte kein Problem mehr dar [Här09]. Daraus ergibt sich das klare Ziel, das neue Bewertungsverfahren auch auf simulierte Leuchtdichteverteilungen anzuwenden. Eine Umsetzung des Verfahrens sollte dadurch einfach möglich sein, da alle benötigten Daten und Einstellungen, wie die Geometrieinformationen, Koordinatensysteme und Kameraparameter, für die Simulation bereits vorliegen müssen und klar definiert sind. Dadurch entfällt die komplizierte Ausrichtung der einzelnen virtuellen Komponenten. Außerdem müssen für die geometrischen Beschreibungen keine material- und fertigungsabhängigen Einflüsse berücksichtigt werden. Die Methodik ist prototypenhaft umgesetzt und muss in einem nächsten Schritt in den Entwicklungsprozess integriert werden.

Für weiterführende Arbeiten kann untersucht werden, inwieweit sich der Optikauslegungsprozess automatisieren lässt. Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus könnten die Optikflächen einer Leuchte hinsichtlich mehrerer Zielfunktionen, wie die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen und die Maximierung der Gleichmäßigkeit, berechnet werden.

## 8.5 Benchmarksystem für Signalleuchten

Bei der Marke Volkswagen PKW ist in den letzten Jahren ein Benchmarksystem entwickelt worden, welches zwei oder mehr Scheinwerfer-Lichtstärkeverteilungen hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien, wie der Breite, Reichweite oder Homogenität, miteinander vergleicht [KM07]. Die Software hat sich im Scheinwerferentwicklungsprozess etabliert, da sie den üblichen Bewertungsprozess für Scheinwerfer widerspiegelt. Bei einer Scheinwerferbeurteilung wird das Untersuchungsobjekt normalerweise ebenfalls mit dem aktuellen Referenz-Scheinwerfer verglichen. Außerdem stellt die Software dem bauteilverantwortlichen Konstrukteur Fakten für eine Diskussion, beispielsweise mit dem Zulieferer, auf Basis von ausgewählten Gütekriterien zur Verfügung. Anhand des Vergleichs zu bereits existierenden Scheinwerfern kann so die bestmögliche Ergebnisqualität erzielt werden.

Die guten Erfahrungen mit dem Scheinwerfer-Benchmarksystem führen zu dem Wunsch, ähnliches auch für Signalleuchten zur Verfügung zu stellen. Dafür fehlten bisher sowohl die Kriterien als auch das Messsystem. Für beides bietet diese Arbeit Lösungen an. Des Weiteren weisen die geschaffenen Ergebnisverteilungen, die in ihrem Aufbau einer Lichtstärkeverteilung ähnlich sind, beste Voraussetzungen zur Schaffung eines Signalleuchten-Benchmarksystems auf. In Abbildung 8.2 ist eine erste Umsetzung skizziert, die im Wesentlichen auf der in Abbildung 5.12 auf Seite 101 gezeigten Benutzeroberfläche der Auswertesoftware beruht. Ähnlich dem Scheinwerfer-Benchmarksystem können zwei Projektstände einer Leuchte oder zwei unterschiedliche Projekte ausgewählt und deren Ergebnisverteilungen betrachtet werden. Die Ergebnisverteilungen werden wertmäßig gleich skaliert, so dass bereits anhand der Falschfarbendarstellungen ersichtlich wird, welcher Projektstand oder welche Leuchte beispielsweise die größeren mittleren Leuchtdichten aufweist. Sobald innerhalb einer Ergebnisverteilung eine Betrachtungsrichtung ausgewählt wird, werden für beide Projekte zusätzlich die Leuchtdichteverteilungen aus der entsprechenden Richtung angezeigt und es kann direkt am Bild verglichen werden, inwieweit sich die Projekte aus dieser Richtung unterscheiden. Ein Hauptbestandteil des neuen Benchmarksystems wird aber die Anzeige der Abweichungen zwischen den zwei



**Abbildung 8.2:** Mögliche Benutzeroberfläche des Signalleuchten-Benchmarksystems mit

- ☐ ...Auswahlmenü für Lichtaustrittsfläche(n),
- ☐ ...Auswahlmenü für das aktuell betrachtete Bewertungskriterium,
- ☐ ...Anzeige der ausgewählten Ergebnisverteilungen für beide Projekte,
- ☐ ...Anzeige der prozentualen Abweichungen zwischen den Ergebnisverteilungen und
- ☐ ...Anzeige der Leuchtdichteverteilungen des aktuellen Betrachtungswinkels.

Ergebnisverteilungen sein. Aus dieser zweidimensionalen Verteilung kann für jedes Bewertungskriterium und jede Betrachtungsrichtung die prozentuale Abweichung zwischen den zwei Projekten abgelesen werden.

Die Umsetzung des Signalleuchten-Benchmarksystems zu einem einsatzfähigen Produkt wird mit hoher Priorität verfolgt. Sobald das System für Schlussleuchten stabil funktioniert, können weitere Signalfunktionen, wie Bremsleuchten, Fahrtrichtungsanzeiger oder Tagfahrleuchten integriert werden. Dazu werden Anpassungen der Kriterien und gegebenenfalls weitere lichttechnische Untersuchungen erforderlich sein.



# A Thesen

1. Die gesetzlichen Anforderungen, die in Form von minimalen und maximalen Lichtstärken in definierten Winkeln an Signalleuchten gestellt werden, sind eher konträr zur Absicherung der Gleichmäßigkeit, weil die Startpunkte des Lichtes unberücksichtigt bleiben. Da der Hauptzweck einer Signalleuchte jedoch in der Signalisation liegt, sollten die gesetzlichen Anforderungen diesem Zweck angemessen hinsichtlich einer Verwendung der Leuchtdichte als der geeigneteren lichttechnischen Größe angepasst werden.
2. Die Bewertung der Gleichmäßigkeit einer Signalleuchte ist vom Betrachtungsabstand abhängig. Es müssen je nach Betrachtungsabstand verschiedene Maßzahlen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit eingesetzt werden.
3. Die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld beeinflusst maßgeblich den Gleichmäßigkeitseindruck. Dieser Zusammenhang kann gezeigt und eine geeignete Vorgabe für den Bewertungsprozess getroffen werden.
4. Der Variationskoeffizient als statistisches Maß korreliert bei geringen Betrachtungsabständen mit der empfundenen Gleichmäßigkeit innerhalb einer leuchtenden Fläche.
5. Die Helligkeitswahrnehmung des Menschen korreliert mit der lichttechnischen Größe Leuchtdichte. Unterschiedliche leuchtende Flächen der gleichen Lichtfunktion einer Signalleuchte können über die mittlere Leuchtdichte bewertet werden.
6. Störende Effekte innerhalb einer leuchtenden Fläche zeichnen sich entweder durch eine starke Kontraständerung auf kurzer Distanz oder eine Region mit anderer mittlerer Leuchtdichte als der restlichen leuchtenden Fläche aus. Für die gezielte Bewertung einer leuchtenden Fläche hinsichtlich dieser Effekte können spezielle Softwaremodelle zur Detektion und Bewertung bereitgestellt werden.
7. Die Abstrahlcharakteristik des Lichtes einer Signalleuchte weist eine starke Richtungsabhängigkeit auf. Daraus ergibt sich der Anspruch, die Leuchtdichten einer Signalleuchte nicht nur aus einer Vorzugsrichtung zu bewerten, sondern mithilfe eines geeigneten Messaufbaus aus allen relevanten Betrachtungsrichtungen. Diese können aus den gesetzlichen Anforderungen für die Lichtstärkemessungen abgeleitet werden.
8. Es lässt sich ein Messaufbau realisieren, welcher nach einer manuellen Kalibrierung vollständig automatisiert die Messung und Bewertung einer Signalleuchte aus einer Vielzahl von Betrachtungsrichtungen vornehmen kann. Für die Umsetzung eignet sich eine Kombination aus einem Fernfeldphotogoniometer und einer Leuchtdichtemesskamera.
9. Die Bewertung einer Lichtfunktion nach einem Gütekriterium, welches auf einem statistischen Maß oder einer Rangordnungszahl beruht, ist erst dann sinnvoll, wenn innerhalb der Leuchtdichteverteilung nur die geometrisch-sichtbaren leuchtenden Flächen und nicht die gesamte Verteilung betrachtet werden.

10. Die Bestimmung der leuchtenden Fläche(n) aus der Leuchtdichtevertellung, z. B. über einen Leuchtdichteschwellwert ohne Nutzung zusätzlicher Informationen, kann nicht zu einem korrekten Ergebnis führen. Beispielsweise werden Verdeckungen durch Bauteile innerhalb der Leuchte niemals mit beachtet. Unerwünschte helle Reflektionen auf Designblenden werden dafür immer mit berücksichtigt. Dieser Missstand kann über die Verwendung von Geometriedaten der Leuchte zur Maskierung der Informationen innerhalb der Leuchtdichtevertellung aufgehoben werden.
11. Um den erweiterten Informationsgehalt innerhalb der Leuchtdichtevertellungen nutzen zu können, müssen die Geometriedaten entsprechend der zum Zeitpunkt der Messung herrschenden Bedingungen perspektivisch transformiert und mit den Leuchtdichtevertellungen überlagert werden.
12. Ein Optimierungsverfahren wie die Goldene-Schnitt-Suche kann dazu eingesetzt werden, eine präzise Überlagerung von Geometriedaten und Leuchtdichtevertellungen zu erreichen.
13. Wenn einmal keine Geometriedaten für eine Leuchte zur Verfügung stehen, kann die Inverse der perspektivischen Projektionsmatrix genutzt werden, um von Bildpunkten der innerhalb der Leuchtdichtevertellungen gezeichneten leuchtenden Flächen auf die 3D-Geometriedaten zu schließen.
14. Die entwickelten zweidimensionalen Ergebnisvertellungen zur Darstellung der einzelnen Bewertungskriterien eignen sich aufgrund ihres Aufbaus zur Verwendung innerhalb eines Benchmarksystems. Zwischen zwei Ergebnisvertellungen unterschiedlicher Leuchtenentwicklungsstände kann die relative Abweichung berechnet und damit eine Aussage über den Fortschritt der Entwicklungsmaßnahmen getroffen werden. Damit wird der Entwicklungsprozess unterstützt und die Ergebnisqualität verbessert.
15. Es existieren Ray-Tracing-Verfahren und zugehörige Berechnungsmodelle, um die Messung von Leuchtdichtevertellungen einer Leuchte aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen innerhalb der Simulation nachzustellen und die entsprechende Anzahl von Leuchtdichtevertellungen mithilfe virtueller Leuchtenmodelle zu erzeugen. Für die korrekte Simulation einer Leuchte müssen deren Geometriedaten vorliegen. Aus diesen Daten kann die leuchtende Fläche extrahiert werden. Da die verschiedenen Koordinatensysteme und die Parameter der virtuellen Kamera eindeutig definiert sind, kann das in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsverfahren, ohne die in der Realität existierenden Abweichungen durch Messungenauigkeiten und Bauteiltoleranzen, innerhalb der Simulationsumgebung umgesetzt werden. Dadurch kann eine Bewertung der Gleichmäßigkeit einer Leuchte bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess erfolgen und damit zu einem Zeitpunkt, wo Änderungen noch mit verhältnismäßig geringen Aufwendungen zu realisieren sind.

# B Anhang

## B.1 Photometrische Grundgrößen und Zusammenhänge

Im Folgenden werden die lichttechnischen Grundgrößen vorgestellt. Als weiterführende Literatur sei auf die Werke [Gal04, BEGS96, Kok03] verwiesen.

### Raumwinkel

Der Raumwinkel  $\Omega$  ist ein Maß für die scheinbare Größe einer aus einem bestimmten Punkt P betrachteten Fläche, siehe Abbildung B.1. Er entspricht als geometrische Größe im dreidimensionalen Raum dem Winkel in der Ebene. Er ist definiert als das Verhältnis der Kugelgröße  $dA_K$  und dem Quadrat des Kugelradius  $r$ , siehe Gleichung (B.1). Die Umrissform auf der Kugeloberfläche spielt dabei keine Rolle. Die Einheit des Raumwinkels ergibt sich aus dem Quotienten der zwei Flächeneinheiten  $\text{m}^2/\text{m}^2$ , hat den Namen Steradian sr und ist, insofern es der physikalische Sachverhalt erfordert, mit anzugeben. Der Raumwinkel  $\Omega_0 = 1 \text{ sr}$  ist der sogenannte Einheitsraumwinkel. Für eine komplette Kugel beträgt der Raumwinkel  $\Omega = 4\pi \cdot \text{sr}$  und für eine Halbkugel dementsprechend  $\Omega = 2\pi \cdot \text{sr}$ .

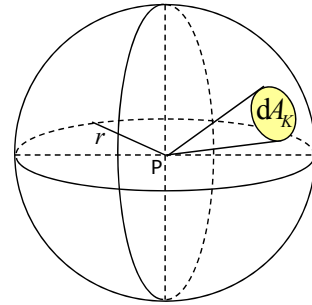


Abbildung B.1: Raumwinkel

$$d\Omega = \frac{dA_K}{r^2} \Omega_0 \quad (\text{B.1})$$

### Lichtstrom

Der Strahlungsfluss  $\Phi_e$  stellt die gesamte Strahlungsleistung dar, die von einem Strahler in den Raum abgegeben wird. Auf die Wellenlänge bezogen, ergibt sich der spektrale Strahlungsfluss  $\Phi_{e\lambda}$ . Wenn dieser spektrale Strahlungsfluss mit der spektralen Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$  bewertet wird, ergibt sich der Lichtstrom  $\Phi$ , siehe Gleichung (B.2). Er hat die Einheit Lumen lm, siehe Abbildung B.2.

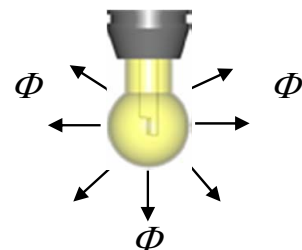


Abbildung B.2: Lichtstrom



Die Konstante  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ , das photometrische Strahlungsäquivalent für photopisches Sehen, gibt die maximal mögliche Lichtausbeute einer Lichtquelle an.

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{B.2})$$

## Lichtstärke

Die Lichtstärke  $I$  bezeichnet den Lichtstromanteil  $d\Phi$ , der in einen Raumwinkel  $d\Omega$  abgegeben wird, siehe Gleichung (B.3). Die meisten Lichtquellen strahlen das Licht in verschiedene Richtungen unterschiedlich stark ab. Die Lichtstärke stellt eine Basisgröße im SI-System dar, siehe Abbildung B.3.

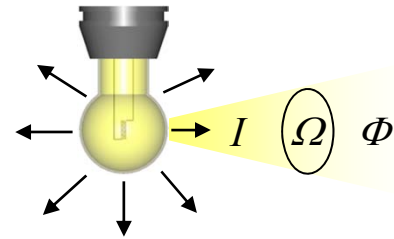


Abbildung B.3: Lichtstärke

Die Darstellung kann als Lichtstärkeverteilungskörper erfolgen. In der automobilen Lichttechnik ist eine Darstellung als Theta-Phi-Diagramm üblich, was einer Aufteilung der Lichtstärken in Azimut- und Polarwinkelsegmente ( $\varphi$ ,  $\vartheta$ ) entspricht.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{B.3})$$

## Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke  $E$  ist als Quotient des auf eine Fläche auftreffenden Lichtstroms  $d\Phi$  und der beleuchteten Fläche  $dA$  definiert und hat die Einheit Lux lx, siehe Gleichung (B.4) und Abbildung B.4.

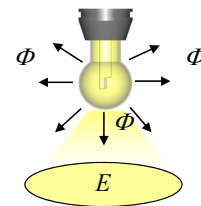


Abbildung B.4: Beleuchtungsstärke

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{B.4})$$

## Leuchtdichte

Der Helligkeitseindruck des Menschen beruht maßgeblich auf der Größe der Leuchtdichte  $L$ . Sie ist definiert als Lichtstromanteil  $d\Phi$ , der in ein Raumwinkelelement  $d\Omega_1$  fällt und sich auf eine scheinbar leuchtende Fläche  $dA_1 \cdot \cos \vartheta$  bezieht, siehe Gleichung (1.1) auf Seite 16 und Abbildung B.5.

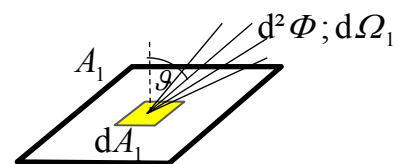


Abbildung B.5: Leuchtdichte

Unter der Annahme, dass es sich bei den beleuchteten Flächen um diffuse Sekundärstrahler handelt, beschreibt Gleichung (B.5) den Zusammenhang zwischen den zwei Grundgrößen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke.

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0} \quad (\text{B.5})$$

## Photometrisches Grundgesetz

Das photometrische Grundgesetz beschreibt den Lichtaustausch zwischen zwei Flächen.

$$\Phi_1 = \int_{\Omega_1} \int_{A_1} L_1(\gamma_1) \cdot dA_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot d\Omega_1 \quad (\text{B.6})$$

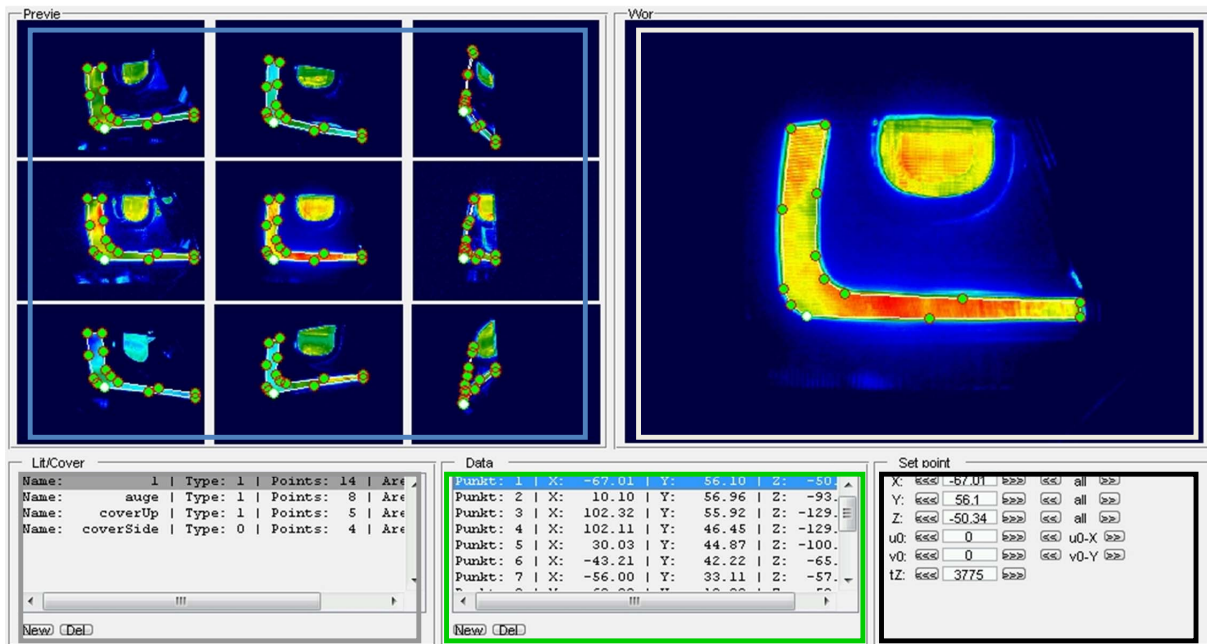
## B.2 Generierung von Geometriedaten im projektiven Raum

In dieser Arbeit wird ein Bewertungsverfahren vorgestellt, welches die perspektivische Transformation von 3D-Geometriedaten in 2D-Bildpunkte nach Gleichung (5.3) beinhaltet. Für das Verfahren ist es notwendig, dass alle Punkte mit der verallgemeinerten perspektivischen Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  nach Gleichung (5.2) multipliziert werden. Die 2D-Punkte können anschließend mit den gemessenen Leuchtdichteverteilungen überlagert und ausgewertet werden. Für dieses Vorgehen sind Geometriedaten unerlässlich. Diese liegen jedoch nicht zu jeder Leuchte vor.

Nachfolgend wird eine Methode gezeigt, die zur Zeichnung von Geometrieinformationen eingesetzt wird und genau auf dem umgekehrten Weg, also einer Matrixdivision mit  $\mathbf{P}$ , funktioniert. Hierbei wird berücksichtigt, dass eine dritte Dimension aus zweidimensionalen Daten nicht wieder hergestellt werden kann. Der Leitgedanke ist, die Lichtaustrittsflächen und die relevanten Verdeckungsflächen direkt in die gemessenen Leuchtdichteverteilungen einzuzeichnen. Dafür wird ein Programm zur Verfügung gestellt, dessen Benutzeroberfläche in Abbildung B.6 dargestellt ist.

Die Benutzeroberfläche zeigt die Leuchte aus neun unterschiedlichen Ansichten. Die dafür nötigen Leuchtdichteverteilungen werden während der, in Abschnitt 5.1.3 ab Seite 88 erläuterten, Justagefahrt aufgenommen. Bei Auswahl einer Ansicht wird die entsprechende Leuchtdichteverteilung im Arbeitsfenster dargestellt. Mithilfe der Maus werden die X- und Y-Koordinaten eines jeden Punktes, der zur Beschreibung einer leuchtenden Fläche gehört, in die Leuchtdichteverteilung eingezeichnet. Die dritte Komponente der 2D-Punkte in homogenen Koordinaten wird zu 1 gesetzt. Daraus ergibt sich für alle anschließend berechneten 3D-Punkte eine Lage auf der XY-Ebene im projektiven Raum. Nun erfolgt die Matrixdivision zur Rückführung der innerhalb der zweidimensionalen perspektivischen Darstellung gezeichneten Punkte in ein orthogonales 3D-System.

Im nächsten Schritt wird eine Rotation und anschließend die perspektivische Projektion der erzeugten Pseudogeometriedaten für jede der neun Ansichten durchgeführt. Da dieser Rechenschritt genau invers zur Matrixdivision ist, ergibt sich für die Leuchtdichteverteilung, die zur Bezugsachse der Leuchte gehört, die Besonderheit, dass die soeben berechneten Punkte genau



**Abbildung B.6:** Benutzeroberfläche der Software. Es werden die neun Ansichten der Leuchte, das Zeichenfenster, die erzeugten Flächen und ihre zugehörigen Punkte angezeigt mit

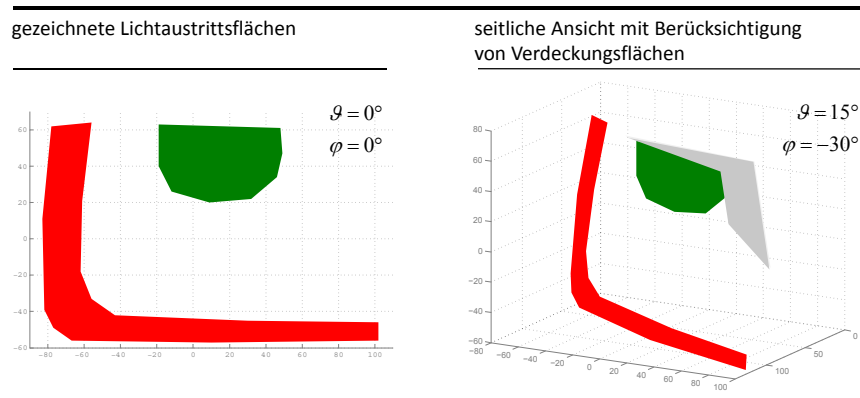
- ☐ ... neun Ansichten der Leuchtdichteverteilungen,
- ☐ ... Arbeitsfenster mit aktuell ausgewählter Leuchtdichteverteilung,
- ☐ ... Struktur zur Auswahl der aktuell zu bearbeitenden Fläche,
- ☐ ... Anzeige und Auswahllisten aller zur Fläche gehörenden Punkte und
- ☐ ... Feinjustage der X-, Y- und Z-Koordinaten des Punktes.

den eingezeichneten entsprechen. In allen anderen Ansichten liegen die Punkte höchstwahrscheinlich nicht korrekt über den Lichtaustrittsflächen, da die Z-Positionen noch nicht richtig bestimmt sind.

Als nächstes werden die Z-Komponenten eines jeden Punktes angepasst. Das Ziel ist dabei, alle Punkte in allen neun Ansichten korrekt auf dem Rand der leuchtenden Fläche zu positionieren. Hier müssen gegebenenfalls Verdeckungen durch angrenzende Geometrien mit berücksichtigt werden. Aufgrund von perspektivischen Abhängigkeiten, vor allem bei größeren Abständen der Punkte in Z-Richtung, kann eine erneute Anpassung der X- und Y-Komponenten nötig werden. Ähnlich der in Abschnitt 5.2.3 ab Seite 93 vorgestellten Ausrichtung kann es außerdem erforderlich sein, den Nullpunkt der Geometriedaten geringfügig anzupassen. Für diesen Zweck ist eine Funktion zur Verschiebung des Nullpunktes und der entgegengesetzten Verschiebung der Daten zum Erhalt der X- und Y-Positionen in die Software integriert, die den in Gleichung (5.7) auf Seite 95 gezeigten Zusammenhang nutzt.

Im letzten Schritt werden die gefundenen 3D-Punkte samt ihrer Verbindungslinien als Polygon in einer Datei gespeichert und stehen für die anschließende Auswertung der gemessenen Leuchtdichteverteilungen zur Verfügung. Obiges Vorgehen wird für alle leuchtenden Flächen und für alle Verdeckungsflächen wiederholt. In Abbildung B.7 ist beispielhaft das Ergebnis aus der vorgestellten Software für eines der Testobjekte dargestellt. Die als relevant erachteten Verdeckungsflächen sind ebenfalls mit dargestellt.

Ein großer Vorteil der gezeigten Methode ist die indirekte Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen, da für die Erstellung der Geometriedaten bereits auf den Messdaten des Testobjektes



**Abbildung B.7:** Gezeichnete Geometriedaten aus zwei unterschiedlichen Richtungen betrachtet.

gearbeitet wird. Nachteilig ist dagegen, dass die Ergebnisqualität bezüglich der Genauigkeit der Modellierung der Geometrien und deren Lage im Raum, maßgeblich vom Engagement des Ausführenden abhängt und damit nur schwer reproduzierbar herzustellen ist. Die größte Herausforderung besteht jedoch in der Überlagerung der Nullpunkte von Goniometer- und Geometrieachsensystem, da eine gegenseitige Kausalität der Überlagerung und dem eigentlichen Geometrieaufbau besteht. Abschließend kann gesagt werden, dass die Ausrichtung von Kamera und Goniometer, die in Abschnitt 5.1.2 ab Seite 86 beschrieben wird, bei Verwendung von gezeichneten Geometriedaten mit allerhöchster Sorgfalt erfolgen muss, damit der angenommene Goniometernullpunkt möglichst genau mit dem tatsächlichen Nullpunkt übereinstimmt. Wenn Geometriedaten der leuchtenden Flächen aus einem CAD-Programm zur Verfügung stehen, sollten diese bevorzugt verwendet werden.

## B.3 Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1

In Tabelle B.1 sind die Einzelergebnisse der Probandenuntersuchung aus Abschnitt 4.1 für den Abgleichversuch zusammengefasst. Zusätzlich sind die Mittelwerte der Leuchtdichten der Referenzleuchten und der gemessenen Leuchtdichtedifferenz angegeben.

**Tabelle B.1:** Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1, Aufbau 1: Abgleich

$L_u$ in $\text{cd}/\text{m}^2$	$L_{\text{ref}}$ in $\text{cd}/\text{m}^2$	$L_{\text{ref,mess}}$ in $\text{cd}/\text{m}^2$	$\Delta L$ in $\text{cd}/\text{m}^2$	$\Delta L/L_{\text{ref}}$	$S$	$S_{\text{err}}(\bar{X})$
0.1	200	190.1	39.16	0.206	0.093	0.0138
0.1	400	396.6	70.59	0.178	0.057	0.0085
0.1	1000	935.3	157.13	0.168	0.040	0.0060
1	200	190.1	40.11	0.211	0.111	0.0166
1	400	396.6	72.18	0.182	0.055	0.0082
1	1000	935.3	157.13	0.168	0.053	0.0078
10	200	190.1	43.72	0.230	0.137	0.0205
10	400	396.6	72.58	0.183	0.060	0.0090
10	1000	935.3	176.77	0.189	0.051	0.0076
100	200	190.1	44.86	0.236	0.077	0.0115
100	400	396.6	76.15	0.192	0.062	0.0092
100	1000	935.3	178.64	0.191	0.064	0.0096

In Tabelle B.2 sind die Einzelergebnisse der Probandenuntersuchung aus Abschnitt 4.1 für den Vergleichsversuch zusammengefasst. Zusätzlich sind die Mittelwerte der Leuchtdichten der Referenzleuchten und der gemessenen Leuchtdichtedifferenz angegeben.

**Tabelle B.2:** Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1, Aufbau 2: Vergleich

$L_u$ in $\text{cd/m}^2$	$L_{\text{ref}}$ in $\text{cd/m}^2$	$L_{\text{ref,mess}}$ in $\text{cd/m}^2$	$\Delta L$ in $\text{cd/m}^2$	$\Delta L/L_{\text{ref}}$	$S$	$S_{\text{err}}(\bar{X})$
0.1	200	216.9	65.94	0.304	0.066	0.0098
0.1	400	436.5	132.26	0.303	0.051	0.0076
0.1	1000	1057	314.99	0.298	0.054	0.0080
1	200	216.9	68.54	0.316	0.060	0.0090
1	400	436.5	140.12	0.321	0.061	0.0091
1	1000	1057	336.13	0.318	0.057	0.0084
10	200	216.9	70.71	0.326	0.077	0.0114
10	400	436.5	152.34	0.349	0.072	0.0106
10	1000	1057	339.30	0.321	0.056	0.0083
100	200	216.9	81.55	0.376	0.060	0.0090
100	400	436.5	161.07	0.369	0.065	0.0096
100	1000	1057	380.52	0.360	0.068	0.0101

## B.4 Einzelergebnisse und Berechnungen zu Abschnitt 4.2

In Tabelle B.3 sind die Einzelergebnisse der Probandenuntersuchung aus Abschnitt 4.2 für die Streifen- und Verlaufsversuche zusammengefasst.

**Tabelle B.3:** Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.2

Art	Richtung	$\bar{X}$	$S$	$S_{\text{err}}(\bar{X})$
Verlauf	oben	65.31	15.59	2.25
Verlauf	rechts	74.58	14.32	2.07
Verlauf	unten	67.58	15.20	2.19
Verlauf	links	74.13	17.48	2.52
Streifen	oben	38.95	8.82	1.27
Streifen	rechts	36.81	10.05	1.45
Streifen	unten	37.29	8.18	1.18
Streifen	links	39.58	9.03	1.30

Nachfolgend erfolgen einige Berechnungen zur Signifikanz der wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung. Die Ergebnisse lauten:

- Streifen sind störender als Verläufe,
- die Streifenorientierung hat keinen Einfluss und
- die Verlaufsorientierung hat einen Einfluss.

## Streifen sind störender als Verläufe

Die erste Untersuchung wird exemplarisch am Beispiel von *Verlauf oben* und *Streifen oben* aus Tabelle B.3 durchgeführt. Es handelt sich um einen zweiseitigen  $t$ -Test für zwei Stichproben, mit  $n = 39, m = 39, \alpha = 0,05$ . Die Fragestellung lautet: Unterscheiden sich die Bewertungen für Streifen signifikant von denen der Verläufe?

Nullhypothese:  $H_0 : \bar{X}_{V,o} = \bar{X}_{S,o}$

Alternativhypothese:  $H_1 : \bar{X}_{V,o} \neq \bar{X}_{S,o}$

Ermittlung der Gesamtvarianz der zwei Stichproben für den Fall das  $n = m$  gilt:

$$S^2 = \frac{S_1^2 + S_2^2}{2}. \quad (\text{B.7})$$

Im gezeigten Beispiel ergibt sich die Gesamtvarianz aus den Standardabweichungen  $S_{V,o} = 15.59$  und  $S_{S,o} = 8.82$  zu  $S^2 = 160.42$ . Daraus lässt sich der erwartete  $t$ -Wert wie folgt berechnen:

$$t_{\text{exp}} = \left| \sqrt{\frac{n}{2}} \cdot \frac{\bar{X}_{V,o} - \bar{X}_{S,o}}{S} \right| = 9.19 \quad (\text{B.8})$$

Aus der  $t$ -Testtabelle ergibt sich für den zweiseitigen Test  $t_{\text{tab}} = t_{(2),76,0.05} = 1.992$  [EH04]. Da  $t_{\text{exp}} > t_{\text{tab}}$  muss die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt werden. Das heißt, Streifen werden anders bewertet als Verläufe, bei 5% Signifikanz. Da sie außerdem weitaus eher detektiert werden als Verläufe mit dem gleichen Helligkeitsabfall, kann gesagt werden, dass Streifen als störender empfunden werden.

## Streifenorientierung hat keinen Einfluss

Die zweite Untersuchung erfolgt exemplarisch am Beispiel von *Streifen oben* und *Streifen links*. Es handelt sich ebenfalls um einen zweiseitigen  $t$ -Test für zwei Stichproben, mit  $n = 39, m = 39, \alpha = 0,05$ . Die Fragestellung lautet: Hat die Orientierung des Streifens einen Einfluss auf die Bewertung?

Nullhypothese:  $H_0 : \bar{X}_{S,o} = \bar{X}_{S,l}$

Alternativhypothese:  $H_1 : \bar{X}_{S,o} \neq \bar{X}_{S,l}$

Die Berechnungen entsprechen den oben gezeigten, weswegen hier nur noch die Ergebnisse ausgewertet werden. Der Tabelle ist der Wert  $t_{\text{tab}} = t_{(2),76,0.05} = 1.992$  zu entnehmen. Das erwartete  $t$  ergibt sich zu  $t_{\text{exp}} = 0.3096$ . Da  $t_{\text{exp}} < t_{\text{tab}}$  kann die Nullhypothese  $H_0$  nicht abgelehnt werden. Das heißt, *Streifen oben* unterscheidet sich nicht signifikant von *Streifen links*. Die Orientierung hat somit keinen Einfluss auf die Bewertung. Daraus lässt sich ableiten, dass auch die deutlich größere Ausdehnung des horizontalen Streifens, keinen Einfluss auf die Bewertung hat. Für die Bewertungen der Verläufe wird hier ein signifikanter Einfluss erwartet, der nachfolgend untersucht wird.

## Verlaufsorientierung hat einen Einfluss

Die letzte Untersuchung erfolgt exemplarisch am Beispiel von *Verlauf oben* und *Verlauf links*. Es handelt sich ebenfalls um einen zweiseitigen  $t$ -Test für zwei Stichproben, mit  $n = 39, m = 39, \alpha = 0,05$ . Die Fragestellung lautet: Hat die Orientierung des Verlaufes einen Einfluss auf die Bewertung?

Nullhypothese:  $H_0 : \bar{X}_{V,o} = \bar{X}_{V,l}$

Alternativhypothese:  $H_1 : \bar{X}_{V,o} \neq \bar{X}_{V,l}$

Die Berechnungen entsprechen wieder den zuvor gezeigten.  $t_{\text{tab}}$  ergibt sich laut Tabelle zu  $t_{\text{tab}} = t_{(2),76,0.05} = 1.992$ . Das erwartete  $t$  berechnet sich zu  $t_{\text{exp}} = 2.3504$ . Da  $t_{\text{exp}} > t_{\text{tab}}$  muss die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt werden. Das heißt, *Verlauf oben* unterscheidet sich signifikant zu *Verlauf links*. Die Seitenlänge des Rechtecks hat somit einen Einfluss auf den sich über die Länge ausdehnenden Verlauf.

## B.5 Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.3

In Tabelle B.4 sind die Einzelergebnisse der Probandenuntersuchung aus Abschnitt 4.3 für die unterschiedlichen Optikkonzepte und Betrachtungspositionen zusammengefasst.

**Tabelle B.4:** Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.3

Kombination	Betrachtung	1. Scheibe	2. Scheibe	Reflektor	$\bar{X}$	$S$	$S_{\text{err}}(\bar{X})$
1	frontal	rot		1	3.15	1.53	0.25
2	frontal	rot	groß	1	4.10	1.68	0.27
3	frontal	rot	klein	1	4.33	1.54	0.25
4	frontal	rot	groß	2	4.74	1.77	0.28
5	frontal	rot	klein	2	4.95	1.97	0.32
6	seitlich	rot	groß	2	5.38	1.95	0.31
7	seitlich	rot	groß	1	6.49	2.02	0.32
8	frontal	rot		2	6.59	2.07	0.33
9	seitlich	rot	klein	2	6.62	1.90	0.30
10	seitlich	rot	klein	1	7.10	1.60	0.26
11	seitlich	rot		2	7.44	2.16	0.35
12	seitlich	rot		1	9.21	1.94	0.31

Im Anschluss werden die nachfolgend genannten Ergebnisse auf Signifikanz geprüft:

- Frontale Ansicht besser als seitliche Ansicht und
- Scheibe mit großen Optiken (Nr. 1) wird besser bewertet als die mit kleinen (Nr. 7).

### Frontale Ansicht besser als seitliche Ansicht

Die Untersuchung erfolgt exemplarisch am Beispiel von *frontal, rot, klein* und *seitlich, rot, klein*. Es handelt sich um einen zweiseitigen  $t$ -Test für zwei Stichproben, mit  $n = 39, m = 39, \alpha = 0,05$ . Die Fragestellung lautet: Unterscheiden sich die Bewertungen für die frontale und seitliche Ansicht?

Nullhypothese:  $H_0 : \bar{X}_3 = \bar{X}_9$

Alternativhypothese:  $H_1 : \bar{X}_3 \neq \bar{X}_9$

Aus der Tabelle ergibt sich  $t_{\text{tab}} = t_{(2),76,0,05} = 1.992$ . Erwartet wird  $t_{\text{exp}} = 3.7997$ . Da  $t_{\text{exp}} > t_{\text{tab}}$  muss die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt werden. Das heißt, die Bewertung der frontalen Ansicht unterscheidet sich zu signifikant von der seitlichen Ansicht.

### Scheibe mit großen Optiken wird besser bewertet als die mit kleinen Optiken

Die Untersuchung erfolgt exemplarisch am Beispiel von *frontal, rot, groß* und *frontal, rot, klein*. Es handelt sich um einen zweiseitigen  $t$ -Test für zwei Stichproben, mit  $n = 39, m = 39, \alpha = 0,05$ . Die Fragestellung lautet: Unterscheiden sich die Bewertungen für die Scheiben mit großen Optiken von denen für kleine?

Nullhypothese:  $H_0 : \bar{X}_{\text{groß}} = \bar{X}_{\text{klein}}$

Alternativhypothese:  $H_1 : \bar{X}_{\text{groß}} \neq \bar{X}_{\text{klein}}$

Das erwartete  $t$  berechnet sich zu  $t_{\text{exp}} = 0.63$ . Der Tabelle ist der Wert  $t_{\text{tab}} = t_{(2),76,0,05} = 1.992$  zu entnehmen. Da  $t_{\text{exp}} < t_{\text{tab}}$  kann die Nullhypothese  $H_0$  nicht abgelehnt werden. Das heißt, die großen Optiken unterscheiden sich nicht signifikant von den kleinen.

## B.6 Berechnungen zu Abschnitt 5.3.4

Nachfolgend wird erläutert, wie aus den erzeugten Einzelergebnissen (metrische Fläche, Standardabweichung, mittlere Leuchtdichte) für die leuchtenden Flächen, das angepasste Bewertungsmodell für den Variationskoeffizienten hergeleitet wird.

Stichprobenvarianz nach Gleichung (3.6) für die Leuchtdichtewerte der ersten leuchtenden Fläche:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n(\bar{x})^2 \right), \quad (\text{B.9})$$

ergibt umgestellt:

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = (n-1) s_x^2 + n(\bar{x})^2. \quad (\text{B.10})$$

Für die zweite leuchtende Fläche gilt analog:

$$s_y^2 = \frac{1}{m-1} \left( \sum_{i=1}^m y_i^2 - m(\bar{y})^2 \right), \quad (\text{B.11})$$



ergibt umgestellt:

$$\sum_{i=1}^m y_i^2 = (m-1) s_y^2 + m (\bar{y})^2. \quad (\text{B.12})$$

Die Gesamtvarianz ergibt sich zu:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n+m-1} \left( (n-1) \sigma_x^2 + (m-1) \sigma_y^2 + n (\bar{x})^2 + m (\bar{y})^2 - (n+m) (\bar{z})^2 \right) \quad (\text{B.13})$$

mit

$$\bar{z} = \frac{n\bar{x} + m\bar{y}}{n+m}. \quad (\text{B.14})$$

Daraus folgt für den Variationskoeffizient für alle betrachteten leuchtenden Flächen analog zu Gleichung 3.8 von Seite 57:

$$V = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\bar{z}} \quad (\text{B.15})$$

Die Ergebnisverteilung  $B_{V_{\Delta f}}$  ermittelt sich dann aus:

$$B_{V_{\Delta f}} = V + (\max(V_{lf}) - \min(V_{lf})). \quad (\text{B.16})$$

Durch die Verwendung der jeweiligen Minima und Maxima für die Berechnung der Differenz der Variationskoeffizienten ist die Gleichung auch für Leuchten anwendbar, die mehr als zwei leuchtende Flächen aufweisen.

## B.7 Messbereiche für alle Signallichtfunktionen

Tabelle B.5 zeigt Vorschläge für Messbereiche und Messauflösungen für alle relevanten Lichtfunktionen der ECE-Regelungen. Die Messbereiche weichen vor allem in vertikaler Richtung ab, da hier aus einer ästhetischen Betrachtungsweise heraus auch aus steileren Vertikalwinkeln auf die Leuchte geschaut werden sollte. Gleiches gilt für die horizontalen Betrachterwinkel der dritten Bremsleuchte (CHMSL).

**Tabelle B.5:** Aus der Norm abgeleitete Messbereiche und Messauflösungen für jede Signalfunktion. Die adaptive Schlusslichtfunktion entspricht in Größe und Auflösung der in Abbildung 6.6 auf Seite 120 gezeigten. Die Anzahl  $n_{LDV}$  der Leuchtdichteverteilungen ergibt sich aus Gleichung (5.1) von Seite 88.

Funktion	Sichtbarkeit nach Norm					abgeleitete Betrachtungsrichtungen					Anzahl $n_{LDV}$	ECE-Regelung
	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$V_{\min}$	$V_{\max}$	step	$\varphi_{\min}$	$\varphi_{\max}$	$-\vartheta_{\min}$	$\vartheta_{\max}$	step		
Blinklicht, vorn	-45°	80°	-15°	15°	5°	-45°	80°	-5°	15°	5°	130	Nr. 6 [ECE006]
Blinklicht, hinten	-45°	80°	-15°	15°	5°	-45°	80°	-5°	25°	5°	182	Nr. 6 [ECE006]
Blinklicht, seitlich	-5°	60°	-15°	15°	5°	-5°	60°	-5°	25°	5°	98	Nr. 6 [ECE006]
Positionslicht	-45°	80°	-15°	15°	5°	-45°	80°	-5°	15°	5°	130	Nr. 7 [ECE007]
Schlusslicht	-45°	80°	-15°	15°	5°	-45°	80°	-5°	25°	5°	182	Nr. 7 [ECE007]
Schlusslicht, fein	-45°	80°	-15°	15°	5°	-45°	80°	-5°	25°	1°	3906	Nr. 7 [ECE007]
Schlusslicht, adaptiv	-45°	80°	-15°	15°	5°	-45°	80°	-5°	25°	1°, 5°	294	Nr. 7 [ECE007]
Bremslicht	-45°	45°	-15°	15°	5°	-45°	45°	-5°	25°	5°	133	Nr. 7 [ECE007]
Bremslicht, CHMSL	-10°	10°	-5°	10°	5°	-45°	45°	-5°	10°	5°	76	Nr. 7 [ECE007]
Nebelschlusslicht	-10°	10°	-5°	5°	2,5°	-10°	10°	-5°	5°	2,5°	45	Nr. 38 [ECE038]
Tagfahrlicht	-20°	20°	-5°	10°	5°	-20°	20°	-5°	25°	5°	63	Nr. 87 [ECE087]

# C Verzeichnisse

## C.1 Abbildungen

1.1	Kfz-Signalleuchten mit ungleichmäßiger Ausleuchtung der leuchtenden Flächen	15
1.2	Einordnung der Bestandteile dieser Arbeit in den Entwicklungsprozess . . . . .	18
1.3	Struktur der vorliegenden Arbeit . . . . .	19
2.1	Hauptbestandteile des Grundlagenkapitels . . . . .	21
2.2	Übersicht über die Unterscheidungsmerkmale von Signalleuchten . . . . .	22
2.3	Bestandteile einer Kfz-Signalleuchte nach [ECE048] . . . . .	23
2.4	Darstellung der 98%- und der 60%-Regel . . . . .	24
2.5	Idealisierte Schlusslichtstärkeverteilung, Mindestwinkel der Lichtverteilung . .	26
2.6	Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen für Tag- und Nachtsehen . . . . .	27
2.7	Helligkeitsmodell von Adams und Cobb [AC22] . . . . .	28
2.8	Bestandteile der Sehleistung . . . . .	30
2.9	Landoltring . . . . .	30
2.10	Abhängigkeit der Sehschärfe von der Adaptationsleuchtdichte und dem Kontrast	31
2.11	Kontrastempfindung und Schwellenleuchtdichtedifferenz . . . . .	31
2.12	Perspektivische Darstellung am Beispiel eines Schachbrettmusters . . . . .	32
2.13	Doppelverhältnis . . . . .	33
2.14	Projektive Transformation und homogene Koordinaten . . . . .	34
2.15	Transformationen im projektiven Raum . . . . .	34
2.16	Lochkameramodell . . . . .	35
2.17	Externe Transformation . . . . .	36
2.18	Tonnen- und kissenförmige Verzerrungen . . . . .	38
2.19	Klassisches Paradigma der Bildverarbeitung nach [Fra04] . . . . .	39
2.20	Kantendetektion am Beispiel einer Leuchtdichteverteilung . . . . .	40
2.21	Segmentierung . . . . .	41
2.22	Beschreibung der sequentiellen Regionenmarkierung . . . . .	42
2.23	Beispiele für die morphologischen Operatoren Erosion und Dilatation . . . . .	43
3.1	Gütemerkmale für die Bewertung von Kraftfahrzeugsignalleuchten . . . . .	45
3.2	Abhängigkeit der Gleichmäßigkeit vom Betrachtungsabstand . . . . .	46
3.3	Schematische Darstellung der Klassen der Gleichmäßigkeit . . . . .	47
3.4	Identifizierte Einflussfaktoren auf die Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .	49
3.5	Leistungsfähigkeit des visuellen Systems . . . . .	49
3.6	Abhängigkeit des vertikalen Betrachterwinkels vom Betrachtungsabstand . . .	50
3.7	Schlusslicht-Leuchtdichteverteilungen aus unterschiedlichen Winkeln . . . . .	51
3.8	Bestimmung des Abstandes zwischen zwei leuchtenden Flächen . . . . .	53
3.9	Teilschritte der Gradientenbewertung . . . . .	57

3.10	Teilschritte zur Detektion von hellen und dunklen Regionen . . . . .	58
3.11	Ergebnisverteilungen für die mittleren Leuchtdichten zweier leuchtender Flächen	60
4.1	Aufteilung und Einordnung der durchgeführten Versuche . . . . .	63
4.2	Versuchsaufbau . . . . .	64
4.3	Testreflektorsystem und Zubehör . . . . .	65
4.4	Stichprobenbeschreibung des ersten Versuchs . . . . .	66
4.5	Details zum Versuchsaufbau und den Versuchsobjekten . . . . .	67
4.6	Ergebnisse für die relativen Leuchtdichteunterschiede . . . . .	69
4.7	Stichprobenbeschreibung des zweiten Versuchs . . . . .	70
4.8	Versuchsaufbau und Details zu den acht gezeigten Mustern . . . . .	71
4.9	Auswertung der Streifenmusterbewertung . . . . .	72
4.10	Details zur Auswertung des Verlaufsmusterversuchs . . . . .	73
4.11	Ergebnisse für die Streifen- und die Verlaufsbewertung . . . . .	73
4.12	Beschreibung der funktionalen Optiken der verwendeten Scheiben . . . . .	74
4.13	Auszug aus dem Fragebogen mit der 12-stufigen Bewertungsskala . . . . .	75
4.14	Bewertungen der untersuchten Optikkonzepte . . . . .	75
4.15	Ergebnisse der Optikkonzeptuntersuchungen . . . . .	76
4.16	Rotationsfunktion für die Untersuchungsobjekte . . . . .	78
4.17	Ergebnisse für die Winkeluntersuchungen für Versuchsobjekt 1 . . . . .	78
4.18	Ergebnisse für die Winkeluntersuchungen für Versuchsobjekt 2 . . . . .	79
4.19	Angepasstes Bewertungsmodell für Versuchsobjekt 2 . . . . .	80
5.1	Bestandteile des Verfahrens zur Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .	83
5.2	Prinzipdarstellung des Messaufbaus . . . . .	85
5.3	Hauptklassen . . . . .	85
5.4	Teilschritte der Komponentenausrichtung . . . . .	87
5.5	Adaptiver Messbereich für die Ergebnisverteilungen . . . . .	89
5.6	Darstellungen zu den Betrachterwinkeln der Justagefahrt . . . . .	90
5.7	Geometriedaten der leuchtenden und verdeckenden Flächen . . . . .	92
5.8	Auswirkungen eines falsch positionierten Koordinatenursprungs . . . . .	93
5.9	Goldene-Schnitt-Suche für die Positionierung der Geometriedaten . . . . .	95
5.10	Überlagerung von Geometriedaten und Leuchtdichteverteilungen . . . . .	97
5.11	Visualisierungsmethoden für Leuchtdichteverteilungen . . . . .	99
5.12	Benutzeroberfläche der Auswertesoftware . . . . .	101
5.13	Kriterien für die komplette Leuchtdichteverteilung . . . . .	102
5.14	Kriterien für einzelne leuchtende Flächen . . . . .	105
5.15	Mittlere Leuchtdichten aller leuchtenden Flächen . . . . .	105
5.16	Kriterien aus kombinierten Ergebnisverteilungen der Kategorien 1 und 2 . . . .	107
6.1	Die in diesem Abschnitt diskutierten Teilaspekte des Untersuchungsgegenstandes.	111
6.2	Balken mit gleichen Extremwerten aber verschiedenen Verläufen . . . . .	112
6.3	Konvergenz des Variationskoeffizienten . . . . .	113
6.4	Suche nach dunklen Regionen in einer LED-Leuchte . . . . .	115
6.5	Messungen an Vergleichsleuchte . . . . .	116
6.6	Ergebnisdarstellung mit adaptivem Messbereich . . . . .	120
8.1	Weiterführende Themen . . . . .	125

---

8.2	Benutzeroberfläche des Signalleuchten-Benchmarksystems . . . . .	129
B.1	Raumwinkel . . . . .	133
B.2	Lichtstrom . . . . .	133
B.3	Lichtstärke . . . . .	134
B.4	Beleuchtungsstärke . . . . .	134
B.5	Leuchtdichte . . . . .	134
B.6	Benutzeroberfläche der Software zum Zeichnen von Geometriedaten . . . . .	136
B.7	Gezeichnete Geometriedaten . . . . .	137

## C.2 Tabellen

2.1	Messpunkte der ECE-Regelung Nr. 7 für eine Schlussleuchte . . . . .	25
2.2	Transformationen und Invarianten der verschiedenen Raumkonzepte. . . . .	34
3.1	Abhängigkeit des Messabstandes zur Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .	46
3.2	Betrachtungsabstand und Sehschärfe ergeben minimalen Signaturabstand . . .	54
3.3	Mögliche Kriterien für die Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .	56
4.1	Optikscheiben des Testreflektorsystems . . . . .	65
4.2	Details zu den Untersuchungen an den Optikkonzepten . . . . .	76
5.1	Vor- und Nachteile von Messsystem und Nahfeldgoniometer . . . . .	86
5.2	Betrachterwinkel der Justagemessungen . . . . .	89
5.3	Zeiten für die einzelnen Bestandteile der Messung . . . . .	90
5.4	Farbliche Kodierung für die Geometriedaten . . . . .	91
5.5	Automatische Positionierung der Geometriedaten . . . . .	94
6.1	Vergleich der Methoden zur Bestimmung der leuchtenden Fläche . . . . .	118
B.1	Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1, Abgleich . . . . .	137
B.2	Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1, Vergleich . . . . .	138
B.3	Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.2 . . . . .	138
B.4	Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.3 . . . . .	140
B.5	Vorschläge für Messbereich und Messauflösung für alle Signalfunktionen . . .	142

## C.3 Abkürzungen

$LM_K^T$	Kunstwort für die Kombination von <b>LMT</b> Fernfeldgoniometer und Leuchtdichtekamera <b>LMK</b>
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AB	<b>Abbieg</b> elicht
Allg	<b>Allgemein</b> gültigkeit
BL	<b>Brems</b> licht, <b>Brems</b> leuchte
CAD	Engl.: <b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>D</b> esign; auf Deutsch: rechnergestützter Entwurf
CCD	Engl.: <b>C</b> harge <b>c</b> oupled <b>d</b> evice; auf Deutsch: lichtempfindliches, elektronisches Bauteil
CHMSL	Engl.: <b>C</b> enter <b>H</b> igh <b>M</b> ount <b>S</b> top <b>L</b> amp; auf Deutsch: 3. Bremsleuchte
CIE	Franz.: <b>C</b> ommission <b>I</b> nternationale <b>D</b> e <b>L'</b> Eclairage; auf Deutsch: Internationale Beleuchtungskommission
CMOS	Engl.: <b>C</b> omplementary <b>m</b> etal <b>o</b> xide <b>s</b> emiconductor
Cov	<b>C</b> ovarianz
ECE	Engl.: <b>E</b> conomic <b>C</b> ommision for <b>E</b> urope; auf Deutsch: Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa
Einf	<b>Einf</b> achheit
FMVSS	Engl.: <b>F</b> ederal <b>M</b> otor <b>V</b> ehicle <b>S</b> afety <b>S</b> tandards; Beschreibung: Vorschriften mit den Mindestanforderungen zum Betreiben von Fahrzeugen
FRA	<b>Fahr</b> trichtungs <b>an</b> zeiger, Blinklicht, Blinkleuchte
Gen	<b>Gen</b> auigkeit
Geo	<b>Geo</b> metrieinformationen
GUI	Engl.: <b>G</b> raphical <b>U</b> ser <b>I</b> nterface; auf Deutsch: graphische Benutzerschnittstelle
H, hor	<b>H</b> orizontalwinkel, <b>h</b> orizontaler Winkel
HDR	Engl.: <b>H</b> igh <b>D</b> ynamic <b>R</b> ange; auf Deutsch: hoher Dynamikumfang
IGES	Engl.: <b>I</b> nitial <b>G</b> raphics <b>E</b> xchange <b>S</b> pecification; Beschreibung: Geometriedatenaustauschformat
Kfz	<b>Kraft</b> fahrzeug

LDV	<b>Leuchtdichte</b> verteilung
LED	<b>Licht emittierende Diode</b>
LF	<b>Lichtaustrittsfläche</b> , hier auch: <b>Leuchtende Fläche</b>
LMK	<b>Leuchtdichtemess</b> kamera
LMT	<b>Lichtmesstechnik</b> GmbH Berlin
LVK	<b>Lichtstärkeverteilungskurve/-körper</b>
MATLAB	Engl.: <b>Matrix Laboratory</b> ; Beschreibung: Softwareumgebung
Mio	<b>Million</b>
MVC	Engl.: <b>Model View Controller</b> ; auf Deutsch: Architekturmuster aus Modell, Darstellung und Steuerung
neg	<b>negativ</b>
NES	<b>Nebelschlusslicht, Nebelschlussleuchte</b>
NHTSA	Engl.: <b>National Highway Traffic Safety Administration</b> ; Beschreibung: amerikanische Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit
OEM	Engl.: <b>Original Equipment Manufacturer</b> ; auf Deutsch: Erstausrüster
OOP	<b>Objektorientierte Programmierung</b>
PEP	<b>Produktentstehungsprozess</b>
pos	<b>positiv</b>
S	<b>Seite</b>
SAE	Engl.: <b>Society of Automotive Engineers</b> ; Beschreibung: amerikanisches Standardisierungsinstitut der Verkehrstechnologie
SBBR	<b>Schluss-, Brems-, Blink-, Rückfahrleuchte</b>
SL	<b>Schlusslicht, Schlussleuchte</b>
STEP	Engl.: <b>Standard for the Exchange of Product model data</b> ; Beschreibung: genormtes Geometriedatenaustauschformat
TIER 1	deutsch: Erstrangiger Automobilzulieferer
TM	Engl.: <b>Tone Mapping</b> ; auf Deutsch: Skalierung von Farb-/Leuchtdichtewerten mit hohem Dynamikumfang, für Ausgabegeräte mit niedrigerem Dynamikumfang
V, ver	<b>Vertikalwinkel, vertikaler Winkel</b>
Var	<b>Varianz</b>
z. B.	<b>zum Beispiel</b>
ZR	<b>Rückfahrlicht, Rückfahrleuchte, Rückfahrscheinwerfer</b>

## C.4 Symbole

$A_K$	Kugelfläche
$A$	intrinsische Kameramatrix
$\alpha$	Schwinkel
$A$	Fläche
$\cdot$	Skalarprodukt zweier Vektoren, z. B. $a \cdot b$
$\times$	Vektor- oder Kreuzprodukt zweier Vektoren, z. B. $a \times b$
$*$	Symbol für die Faltung zweier Vektoren, z. B. $a * b$
$a^T$	transponierter Vektor (=Zeilenvektor)
$A^T$	transponierte Matrix
$A^{-1}$	Inverse der Matrix $A$
$\wedge, \vee$	logisches UND, ODER (Operator)
$\wedge, \vee$	logisches UND, ODER (Verknüpfung)
$E$	Beleuchtungsstärke
$B(\vartheta, \varphi)$	Ergebnisverteilung
$b_{\text{pixel}}$	Gegenstandsweite in Pixeln
$b$	Gegenstandsweite
$\mathcal{B}$	zweidimensionaler Binomialfilter
$C_S$	Schwellenkontrast
$C$	Kontrast
$c$	Kamerahauptpunkt
$D$	extrinsische Kameramatrix
$\delta$	Disparität
$d_{\text{pixel}}$	eindimensionale Ausdehnung eines Pixels
$F$	absolute Abweichung
$P$	verallgemeinerte perspektivische Projektionsmatrix
$f_{01}, f_{02}$	Objektivbrennweiten
$f$	relative Abweichung
$\mathcal{G}$	zweidimensionaler Sobeloperator
$\gamma_1$	Winkel unter dem eine leuchtende Fläche gesehen wird
$H$	Homographiematrix
$H$	Horizontalwinkel der Lichtstärkeverteilung
$h_C$	Höhe des Objektivmittelpunktes der Kamera
$h_G$	Höhe des Goniometerursprungs
$h$	Betrachterhöhe
$h$	relative Helligkeit
$I$	Lichtstärke
$K_m$	photometrisches Strahlungsäquivalent für photopisches Sehen
$\kappa, \eta$	radialer und tangentialer Verzerrungskoeffizient
$\Delta L_S$	Schwellenleuchtdichtedifferenz
$L_a$	Adaptationsleuchtdichte
$L_o$	Objektleuchtdichte
$L_u$	Umfeldleuchtdichte
$L$	Leuchtdichte
$L'(u, v)$	maskierte Leuchtdichteverteilung



$\bar{L}_u$	mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld (mittlere Umfeldleuchtdichte)
$\bar{L}$	mittlere Leuchtdichte
$\bar{L}_{\text{ref}}$	mittlere Referenzleuchtdichte der Messobjekte
$L_S$	Schwellenleuchtdichte
$\lambda$	Wellenlänge
$M$	zweidimensionale Binärmaske
$\mathcal{M}$	zweidimensionaler Morphologieoperator
$\tilde{M}_C$	Punkt in homogenen Kamerakoordinaten
$\tilde{M}_W$	Punkt in homogenen Weltkoordinaten
$n_{\text{LDV}}$	Anzahl der zu messenden Leuchtdichteverteilungen
$\Omega$	Raumwinkel
$\Phi$	Goldene Zahl, Goldenes Verhältnis
$\Phi$	Lichtstrom
$P'$	perspektivische Projektionsmatrix
$p_1$	Punkt in Vektordarstellung
$\Phi_{e\lambda}$	spektraler Strahlungsfluss
$R$	Rotationsmatrix
$r$	Kugelradius
$\mathbb{R}^n$	euklidischer Raum der Dimension $n$ , i. A. $n = 2, 3$
$r$	Betrachtungsabstand und Abstand zwischen Kamera und Messobjekt
$S_X$	Standardabweichung von $X$
$s, S$	Skalierungsfaktoren der perspektivischen Projektion
$s_{\text{skew}}$	Scherung
$s$	Sehschärfe
$\vartheta, \varphi, \psi$	Rotationswinkel um $X$ -, $Y$ - und $Z$ -Achse
$\vartheta_{\text{step}}, \varphi_{\text{step}}$	Schrittweite zwischen den diskreten Betrachtungswinkeln $\vartheta, \varphi$ der Ergebnisverteilungen $B$
$\vartheta, \varphi$	Betrachtungswinkel (Polar, Azimut) der Ergebnisverteilungen $B$
$t$	Translationsvektor
$k_u, k_v$	horizontaler und vertikaler Skalierungsfaktor
$u_0, v_0$	horizontale und vertikale Kamerahauptpunktanteile
$u_d, v_d$	horizontale und vertikale Pixelkoordinaten (verzerrt)
$u, v$	horizontale und vertikale Pixelkoordinaten
$V'$	Variationskoeffizient einer leuchtenden Fläche
$V$	Vertikalwinkel der Lichtstärkeverteilung
$v$	Fluchtpunkt (Engl.: vanishing point)
$V(\lambda)$	spektrale Hellempfindlichkeit (photopisch)
$V'(\lambda)$	spektrale Hellempfindlichkeit (skotopisch)
$\Delta X_C, \Delta Y_C, \Delta Z_C$	Verschiebung der virtuellen Kamera
$\Delta X_{\text{geo}}, \Delta Y_{\text{geo}}, \Delta Z_{\text{geo}}$	Verschiebung der Geometriedaten
$\Delta X_G, \Delta Y_G, \Delta Z_G$	Verschiebung des Messobjektes
$Z_B, S_B$	Anzahl horizontaler und vertikaler Messpunkte von $B$
$Z_L, S_L$	Anzahl horizontaler und vertikaler Messpunkte von $L$

## C.5 Veröffentlichungen

- [HMKM09] Hahn, N., Mensch, D., Koeth, K. und Manz, K.: *Analysis of homogeneity from signal lamps by luminance*. In: *8<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009, Proceedings of the Conference*, Seiten 701–712, Darmstadt, 2009. ISBN 3831609047.
- [KCV<sup>+</sup>10] Kiel, H., Cerny, P., Vogler, S., Mensch, D. und Ziehl, C.: *Neue Bewertungsmethoden für Kfz-Scheinwerfersysteme*. In: *19. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Österreichs, Deutschlands, der Niederlande und der Schweiz - LICHT 2010, Beitrag auf Tagungsband-CD*. LTG - Lichttechnische Gesellschaft Österreichs, 2010.
- [KM07] Kiel, H. und Mensch, D.: *Softwarebasierte Ausrichtung und Bewertung von Lichtverteilungen*. In: *8. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2007, Beitrag auf Tagungsband-CD*, Dörfeld, 2007. Technische Universität Ilmenau.
- [KMSK12] Kiel, H., Mensch, D., Studeny, C. und Koether, G.: *Signal Lamp Luminance Distribution Simulation and Assessment Using the Volkswagen Benchmark System*. In: *1<sup>st</sup> International Light Simulation Symposium - ILISIS 2012, Proceedings of the Conference*, Seiten 243–260, Nürnberg, 2012. Steinbeiss-Edition, ISBN 3941417843.
- [KMOV09] Kiel, H., Mensch, D. und Vogler, S.: *Anforderungen an Simulationssoftware zur Lichtsimulation im Kfz Entwicklungsprozess*. In: *9. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2009, Beitrag auf Tagungsband-CD*, Dörfeld, 2009. Technische Universität Ilmenau.
- [KMVK09] Kiel, H., Mensch, D., Vogler, S. und Kleimeyer, M.: *New Methods of Development Process of Automotive Lighting Systems*. In: *8<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009, Proceedings of the Conference*, Seiten 192–204, Darmstadt, 2009. ISBN 3831609047.
- [KMOV08] Kiel, H., Mensch, D., Vogler, S. und Ziehl, C.: *Lichtsimulation bei Volkswagen: Methoden und Anwendungen*. In: *18. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, Österreichs, der Schweiz und der Niederlande - LICHT 2008, Beitrag auf Tagungsband-CD*, Ilmenau, 2008. LTG - Lichttechnische Gesellschaft.
- [KRM<sup>+</sup>10] Kiel, H., Richter, B., Mensch, D., Studeny, C., Li, M. und Walter, B.: *Erweiterte Lichtsimulation von Kfz-Leuchten: Aspekte und Methoden*. In: *19. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Österreichs, Deutschlands, der Niederlande und der Schweiz - LICHT 2010, Beitrag auf Tagungsband-CD*. LTG - Lichttechnische Gesellschaft Österreichs, 2010.
- [Men07] Mensch, D.: *Automatische Optimierung in der lichttechnischen Auslegung von Kfz-Außenbeleuchtung*. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.

- [Men08] Mensch, D.: *Automatische Auslegung lichtoptischer Funktionsflächen mittels mehrkriterieller, evolutionärer Optimierungsalgorithmen*. In: 18. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, Österreichs, der Schweiz und der Niederlande - LICHT 2008, Beitrag auf Tagungsband-CD, Ilmenau, 2008. LITG - Deutsche Lichttechnische Gesellschaft.
- [Men09a] Mensch, D.: *Automatisierte Bestimmung der räumlichen Lage und Form der leuchtenden Fläche einer Signalleuchte für die Beurteilung der Homogenität aus beliebigen Beobachtungsrichtungen*. In: 9. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2009, Beitrag auf Tagungsband-CD, Dörfeld, 2009. Technische Universität Ilmenau.
- [Men09b] Mensch, D.: *Efficient processing of simulated and measured ray data to determine and evaluate the lit appearance of tail lamps*. In: 8<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2009, Proceedings of the Conference, Seiten 714–723, Darmstadt, 2009. ISBN 3831609047.
- [Men09c] Mensch, D.: *Effiziente Verarbeitung von Strahldatensätzen aus Simulation und Messung*. In: LuxEuropa 2009, Proceedings of the 11. Conference, Seiten 1033–1040, Istanbul, 2009.
- [Men10a] Mensch, D.: *Automated rating of automotive signal lamps*. In: Vehicle And Infrastructure Safety Improvement In Adverse Conditions And Night Driving - V.I.S.I.O.N 2010, Proceedings of the Conference, Versailles, 2010. SIA - The Société des Ingénieurs de l'Automobile.
- [Men10b] Mensch, D.: *Software tool to support the virtual headlamp and tail lamp development process: VRViewer 2010*. Speech on the 12<sup>th</sup> Corporate Conference on VR & AR, Braunschweig, 2010.
- [MK10] Mensch, D. und Kiel, H.: *Automatische Bewertung von Kfz-Signalleuchten*. In: 19. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Österreichs, Deutschlands, der Niederlande und der Schweiz - LICHT 2010, Beitrag auf Tagungsband-CD. LTG - Lichttechnische Gesellschaft Österreichs, 2010.
- [MKZ09] Mensch, D., Kiel, H. und Ziehl, C.: *Evaluation of stray light from peripheral areas of the luminous intensity distribution of headlamps*. In: LuxEuropa 2009, Proceedings of the 11. Conference, Seiten 1049–1056, Istanbul, 2009.
- [MZ07] Mensch, D. und Ziehl, C.: *Untersuchungen zur Erkennung und Bewertung von Inhomogenitäten der peripheren Scheinwerferfunktionen*. Medienprojekt, Abschlussarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.

## C.6 Literatur

- [AC22] Adams, E. Q. and Cobb, P. W.: *Journal of Experimental Psychology, Volume 5, Issue 1*, chapter The Effect on Foveal Vision of Bright (and Dark) Surroundings. V, pages 39–45. Psych Bulletin, 1922.
- [Arm01] Armbruster, D.: *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001, ISBN 3831600163.
- [BB06] Burger, W. und Burge, M. J.: *Digitale Bildverarbeitung - Eine Einführung mit Java und ImageJ*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage, 2006, ISBN 3540309403.
- [BEGS96] Baer, R., Eckert, M., Gall, D. und Schnor, R.: *Beleuchtungstechnik: Grundlagen*. Verlag Technik GmbH, Berlin, 2., stark bearbeitete Auflage, 1996, ISBN 3341011153.
- [BH09] Buber, R. und Holzmüller, H.: *Qualitative Marktforschung: Konzepte-Methoden- Analysen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage, 2009, ISBN 9783834909763.
- [CCDG07] Courteille, F., Crouzi, A., Durou, J.-D. und Gurdjos, P.: *Machine Vision and Applications, 2007, Volume 18, Number 5*, Kapitel Shape from shading for the digitization of curved documents, Seiten 301–316. Springer-Verlag, 2007.
- [Chr04] Christie: *User's Manual Christie LU77, Model 38-VIV403-01*. CHRISTIE DIGITAL SYSTEMS, Inc., Ontario, 2004.
- [Dah01] Dahlem, T.: *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001, ISBN 3896758985.
- [Dam95] Damasky, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1995.
- [DIN12368] Deutsches Institut für Normung: *DIN 12368: Anlagen zur Verkehrssteuerung - Signalleuchten*, erstellt 2000, letzte Änderung Juli 2006.
- [DIN5031] Deutsches Institut für Normung: *DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*, 1982.
- [DIN50327] Deutsches Institut für Normung: *DIN 5032-7: Lichtmessung; Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemeßgeräten*, 1985.
- [DIN50358] Deutsches Institut für Normung: *Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 8: Arbeitsplatzleuchten - Anforderungen, Empfehlungen und Prüfung*, erstellt 1994, letzte Änderung Juli 2007.
- [DIN675271] Deutsches Institut für Normung: *DIN 675271: Lichttechnische Eigenschaften von Signallichtern im Verkehr - Teil 1: Ortsfeste Signallichter im Straßenverkehr*, erstellt 1987, letzte Änderung Mai 2001.

- [ECE006] ECE-Regelung Nr. 6, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrtrichtungsanzeigern für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger*, erstellt 1967, letzte Änderung 19.08.2010.
- [ECE007] ECE-Regelung Nr. 7, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Begrenzungsleuchten, Schlussleuchten, Bremsleuchten und Umrissleuchten für Kraftfahrzeuge (mit Ausnahme von Krafträdern) und ihre Anhänger*, erstellt 1967, letzte Änderung 19.08.2010.
- [ECE038] ECE-Regelung Nr. 38, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Nebenschlussleuchten für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger*, erstellt 1978, letzte Änderung 09.12.2010.
- [ECE048] ECE-Regelung Nr. 48, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen*, erstellt 1982, letzte Änderung 15.11.2006.
- [ECE048S4] ECE Regulation No. 48, Supplement 4, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the instalation of light-signalling devices*, 05.03.2010.
- [ECE087] ECE-Regelung Nr. 87, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Leuchten für Tagfahrlicht für Kraftfahrzeuge*, erstellt 1990, letzte Änderung 15.10.2008.
- [ECE112] ECE-Regelung Nr. 112, UNECE (United Nations Economic Commission For Europe): *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen ausgerüstet sind*, erstellt 2001, letzte Änderung 2007.
- [Eck93] Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik GmbH Berlin, München, 1993, ISBN 9783341010723.
- [Edg02] Edgerton, S.Y.: *Die Entdeckung der Perspektive*. Wilhelm Fink Verlag, 2002, ISBN 3770535561.
- [EH04] Elpelt, B. und Hartung, J.: *Grundkurs Statistik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 3., verbesserte und aktualisierte Auflage, 2004, ISBN 3486275925.
- [EPLLA] SAE International: *Proposal: Surface vehicle recommended practice, determination of the effective projected luminous lens area (eplla)*, 2010.
- [Evo11] Evonik Röhm GmbH: *Produktinformation: PLEXIGLAS Satinice df23 8N*, 04.04.2011.
- [FeV2009] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 52, Fahrerlaubnis-Verordnung, Verordnung über die Zulassung von Personen zum Straßenverkehr*, erstellt 1998, letzte Änderung 2009.

- [FMVSS108] NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration: *Federal motor vehicle safety standards and regulations, standard no. 108: Lamps, reflective devices, and associated equipment*, 1999.
- [Fra04] Franke, K. H.: *Vorlesungsskript: Bildverarbeitung I (WS 2004/2005)*. Technische Universität Ilmenau, 2004.
- [FS98] Feichtinger, H. G. and Strohmer, T.: *Gabor Analysis and Algorithms*. Birkhäuser, 1998, ISBN 0817639594.
- [Gal83] Gall, D.: *Die Kontrastempfindung als Ausgangspunkt für die Beleuchtungsplanung*. Dissertation, Technische Hochschule Ilmenau, 1983.
- [Gal04] Gall, D.: *Grundlagen der Lichttechnik Kompendium*. Richard Pflaum Verlag GmbH, München, 2004, ISBN 379050923X.
- [Gre01] Gregory, R. L.: *Psychologie des Sehens*, Kapitel Auge und Gehirn. Rowohlt Tb., 2001, ISBN 3499608057.
- [Hau77] Haubner, P.: *Zur Helligkeitsbewertung quasi-achromatischer Reize*. Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe, 1977.
- [Hof75] Hofmann, H.: *Über das Bemessen der Leuchtdichte, Farbart und Darbietungszeit von Signallichtern unter verschiedenen Beobachtungsbedingungen*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1975.
- [Hof03] Hoffmann, A. v.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2003, ISBN 3899590465.
- [Hor00] Horn, B.: *Tsai's camera calibration method revisited*. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [Här09] Häring, S.: *Erweiterung des Simulationsprozesses von Lichtfeldern für die virtuelle Leuchtenentwicklung im Automobilbau*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2009.
- [Huh96] Huhn, W.: *Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen in der Automobilindustrie*. In: *Tagungsband 40 Jahre Lichttechnik Darmstadt*, 1996.
- [HZ04] Hartley, R. I. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, second edition, 2004.
- [IGES53] U.S. Product Data Association: *Initial graphics exchange specification iges 5.3*, 2006.
- [ISO10303] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN ISO 10303: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Standard for the exchange of product model data*, 2004.
- [ISO8596] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN ISO 8596: Augenoptik - Sehschärfeprüfung - Das Normsehzeichen und seine Darbietung*, erstellt 1996, letzte Änderung Oktober 2009.

- [Jäh05] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 6., aktualisierte und überarbeitete Auflage, 2005.
- [Kal09] Kaltenbach, A.: *Entwicklung einer intelligenten Heckleuchte zur adaptiven Anpassung der Lichtsignale an variable Sichtbedingungen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2009, ISBN 9783899599442.
- [Kie53] Kiefer, J.: *Sequential minimax search for a maximum*. In: *Proceedings of the American Mathematical Society, Volume 4, Number 3*, Seiten 502–506, 1953.
- [Kle03] Kleinkes, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*. Dissertation, Universität Bielefeld, 2003.
- [KM07] Kiel, H. und Mensch, D.: *Softwarebasierte Ausrichtung und Bewertung von Lichtverteilungen*. In: *8. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2007, Tagungsband*, Dörnfeld, 2007. Technische Universität Ilmenau.
- [KM10] Kiel, H. und Mensch, D.: *Automatische Bewertung von Kfz-Signalleuchten*. In: *19. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Österreichs, Deutschlands, der Niederlande und der Schweiz - LICHT 2010, Tagungsband*. LTG - Lichttechnische Gesellschaft Österreichs, 2010.
- [Koe08] Koeth, K.: *Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung hinsichtlich Sicht und Signalisation*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008.
- [Koe09] Koeth, K.: *Notwendigkeit der Modernisierung der ECE-Regelungen über Leuchten*. In: *9. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2009, Tagungsband*, Dörnfeld, 2009. Technische Universität Ilmenau.
- [Kok03] Kokoschka, S.: *Vorlesungsskript: Grundlagen der Lichttechnik*. Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2003.
- [Krü09] Krüger, U.: *Kalibrierschein 0030; WK-K; 2009-03 für: LMK 96-2*. Technischer Bericht, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Deutschland, 2009.
- [KRM<sup>+</sup>10] Kiel, H., Richter, B., Mensch, D., Studeny, C., Li, M. und Walter, B.: *Erweiterte Lichtsimulation von Kfz-Leuchten: Aspekte und Methoden*. In: *19. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Österreichs, Deutschlands, der Niederlande und der Schweiz - LICHT 2010, Tagungsband*. LTG - Lichttechnische Gesellschaft Österreichs, 2010.
- [Lad11] Ladenburger, A.: *Homogeneity of signal lamps - from simulation to reality*. In: *9<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2011, Proceedings of the Conference*, Seiten 759–763, Darmstadt, 2011. ISBN 3831640939.
- [LK76] Lindner, H. und Knoche, K.: *Anpassungsleistungen des optischen Analysators*. In: *Schleisungen des optischen Analysators*, 1976.
- [LMT02] LMT - Lichtmesstechnik Berlin GmbH: *LIMES 2000 Documentation and Manual, Release 3.1.101*. LMT - Lichtmesstechnik Berlin GmbH, Berlin, Deutschland, Berlin, Jan. 2002.

- [LT89] Lenz, R. und Tsai, R. Y.: *Calibrating a Cartesian Robot with Eye-on-Hand Configuration Independent of Eye-to-Hand Relationship*. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 11 (9), Seiten 916–928, 1989.
- [Men07] Mensch, D.: *Automatische Optimierung in der lichttechnischen Auslegung von Kfz-Außenbeleuchtung*. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [Men09] Mensch, D.: *Automatisierte Bestimmung der räumlichen Lage und Form der leuchtenden Fläche einer Signalleuchte für die Beurteilung der Homogenität aus beliebigen Beobachtungsrichtungen*. In: *9. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2009, Tagungsband*, Dörfeld, 2009. Technische Universität Ilmenau.
- [Men10] Mensch, D.: *Software tool to support the virtual headlamp and tail lamp development process: vrvviewer 2010*. Speech on the 12<sup>th</sup> Corporate Conference on VR & AR, Braunschweig, 2010.
- [Mey07] Meywerk, M.: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 3540498664.
- [MH07] Massot, C. and Hérault, J.: *International Journal of Computer Vision*, 2008, Volume 76, Number 2, chapter Model of Frequency Analysis in the Visual Cortex and the Shape from Texture Problem, pages 165–182. Springer Science+Business Media, LLC, 2007.
- [MZ07] Mensch, D. und Ziehl, C.: *Untersuchungen zur Erkennung und Bewertung von Inhomogenitäten der peripheren Scheinwerferfunktionen*. Medienprojekt, Abschlussarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [Nar03] Narisada, K.: *Visual problems associated with driving experiments*. In *5<sup>th</sup> International Symposium on Progress in Automobile Lighting - PAL 2003, Proceedings of the Conference*, pages 698–714, Darmstadt, 2003. Herbert Utz Verlag GmbH, München, ISBN 3831602573.
- [Olp01] Olpe, P.: *Die Lochkamera: Funktion und Selbstbau*. Lindemanns, Stuttgart, 4., veränderte Auflage, 2001, ISBN 3895061727.
- [PKP07] Poschmann, R., Krüger, U. und Porsch, T.: *Bedienhandbuch LMK2000*. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Deutschland, 15.08.2007.
- [PKPK10] Poschmann, R., Krüger, U., Porsch, T. und Kempe, H.: *Bedienhandbuch LMK LabSoft*. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Deutschland, 17.12.2010.
- [RDO<sup>+</sup>08] Reidenbach, H. D., Dollinger, K., Ott, G., Janßen, M. und Brose, M.: *Blendung durch optische Strahlungsquellen*, Kapitel Grundbegriffe von Lichtstärke, Helligkeit, Helligkeit und Leuchtdichte im Zusammenhang mit Blendung, Seite 41. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Berlin, Dresden, 2008, ISBN 9783882610932.
- [Rip01a] Ripperger, J.: *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001, ISBN 3896758187.



- [Rip01b] Ripperger, J.: *Luminance: the Future Photometric for Rear- and Brake-lights*. In: *4<sup>th</sup> International Symposium on Progress in Automobile Lighting - PAL 2001, Proceedings of the Conference*, Seiten 810–816, Darmstadt, 2001. Herbert Utz Verlag GmbH, München, ISBN 389675971X.
- [SC99] Schmidt-Clausen, H. J.: *Vorlesungsskript: Grundlagen der Lichttechnik*. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 1999.
- [Sch05] Schreer, O.: *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005, ISBN 354023439X.
- [Sch07] Schierz, C.: *Wird die Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen?* In: *8. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs - Lux junior 2007, Tagungsband*, Dörfel, 2007. Technische Universität Ilmenau.
- [Sch09] Schmidt, F.: *Nahfeldgoniophotometer: Messmethode und Geräteeigenschaften, Vorschlag für Norm DIN 5032*. Technischer Bericht, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, 2009.
- [Sch10] Schwanengel, C.: *Gegenüberstellung von Messtechniken zur Messung von Lichtstärkeverteilungen und Lichtstärkeverteilungsausschnitten*. Technischer Bericht, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Deutschland, 2010.
- [Son99] Sony: *Device description for progressive scan ccd image sensor with square pixel: Icx084al*. Technical report, Sony Corporation, 1999.
- [Sta10] Statistisches Bundesamt: *Statistisches Jahrbuch 2010*. Statistisches Bundesamt (Federal Statistical Office), Wiesbaden, 2010, ISBN 9783824608980.
- [Ste08] Steinmüller, J.: *Bildanalyse - Von der Bildverarbeitung zur räumlichen Interpretation von Bildern*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008, ISBN 3540797424.
- [Tsa87] Tsai, R. Y.: *A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses*. In *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pages 323–344. IEEE, 1987.
- [VKW03] Völker, S., Kleinkes, M. und Wördenweber, B.: *Headlamp Rating System*. In: *SAE Lighting Technology, SP-1787*, 2003.
- [Völ06] Völker, S.: *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern. Habilitation*. Universität Paderborn, 2006.
- [Vol10] Volkswagen AG: *Volkswagen Golf: Betriebsanleitung, Ausgabe 11.2010*, Kapitel Licht und Sicht: Automatische Fahrlichtsteuerung, Seite 110. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2010.
- [Wei10] Weise, H.: *Kalibrierung einer Leuchtdichtekamera zum Einsatz in einem Stereoanalyse-Messsystem*. Bachelorarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2010.

- 
- [WR11] Wallentowitz, H. und Reif, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen - Komponenten - Systeme - Anwendungen*. Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2., verbesserte und aktualisierte Auflage, 2011, ISBN 9783834807007.
- [Zie07] Ziehl, C.: *Algorithmen und Programmierung zur visuellen Bewertung von gemessenen und simulierten Lichtverteilungen der Kfz-Außenbeleuchtung*. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2007.